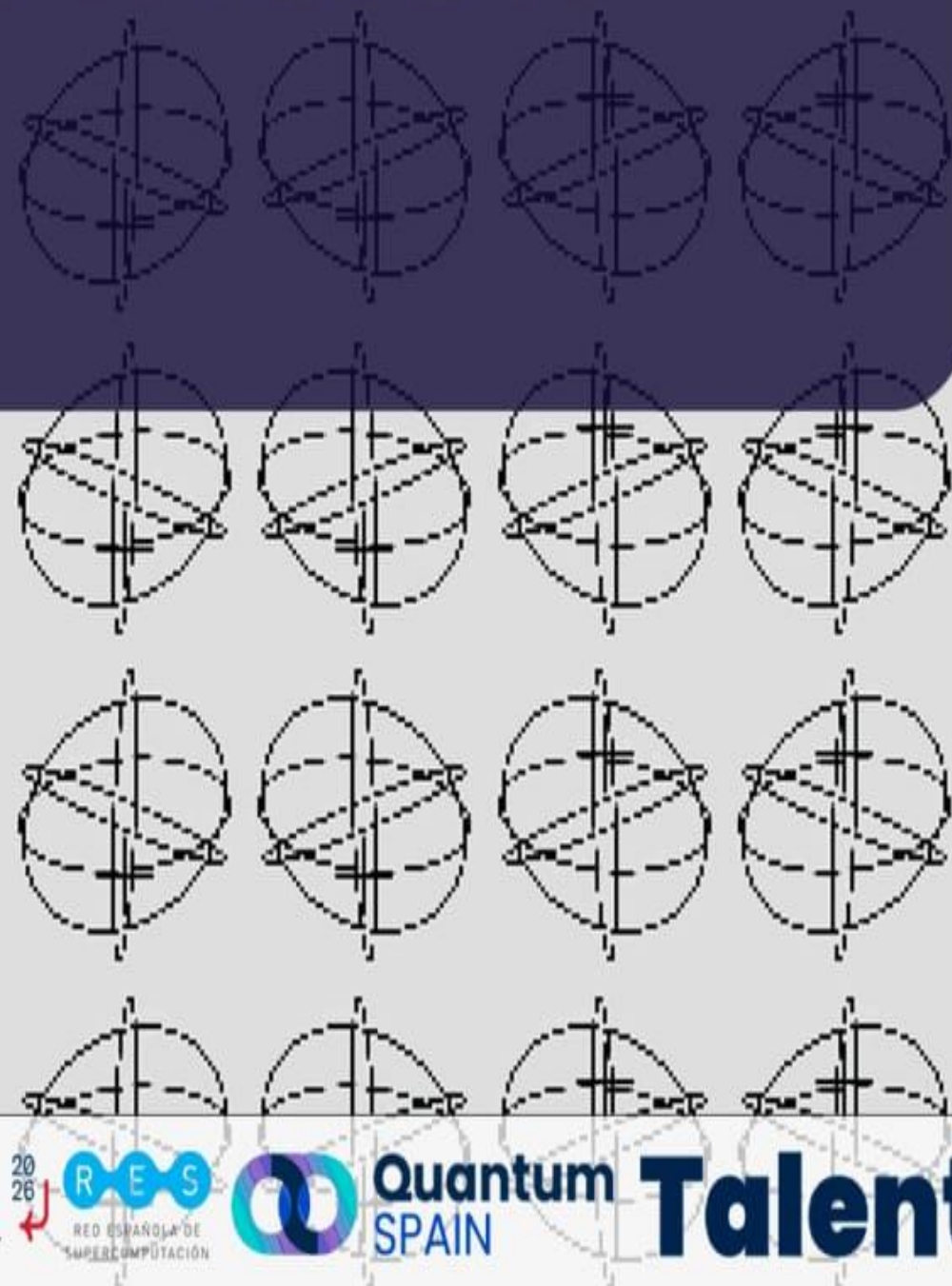


CURSO DE COMPUTACIÓN CUÁNTICA 6.0

3-6 JUNIO

CÁCERES



ORGANIZA
Y PATROCINA:



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y DE LA FUNCIÓN PÚBLICA



Plan de
Recuperación,
Transformación
y Resiliencia

España | digital



Quantum
SPAIN

Talento



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO



Plan de
Recuperación,
Transformación
y Resiliencia

EQI Escuela de
organización
industrial

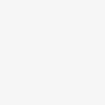
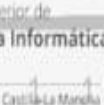


4CAMhub

COLABORA:



COMPUTAEX
Centro de Supercomputación
de Extremadura



Fundamentos de Comunicaciones Cuánticas

Curso de Computación Cuántica 6.0.

Estefanía Prior Cano – Cáceres - Junio 2025

Índice

1. Introducción
2. Optoelectrónica
 1. Emisores de luz
 2. Detectores de luz
 3. Otros componentes optoelectrónicos
3. QKD: sistemas experimentales
4. Conclusiones
5. Bibliografía

Introducción

...hoy he venido a contaros muchos secretos...



Comunicaciones



Comunicaciones

- Las personas nos comunicamos, es decir, transmitimos información entre un emisor y un receptor.
- Componentes de la Comunicación
 - **Emisor:** La persona o entidad que envía el mensaje.
 - **Receptor:** La persona o entidad que recibe el mensaje.
 - **Mensaje:** La información que se transmite.
 - **Canal:** El medio a través del cual se envía el mensaje.
 - **Código:** El lenguaje o sistema de signos utilizado para transmitir el mensaje.
 - **Contexto:** Las circunstancias en las que se produce la comunicación.
- Lo hacemos mediante el habla, la escritura o señales visuales. Este proceso es fundamental para la interacción humana y la organización social.

En telecomunicaciones, lo que hacemos es transmitir información, también a larga distancia, también cantidades masivas, también a altas velocidades.

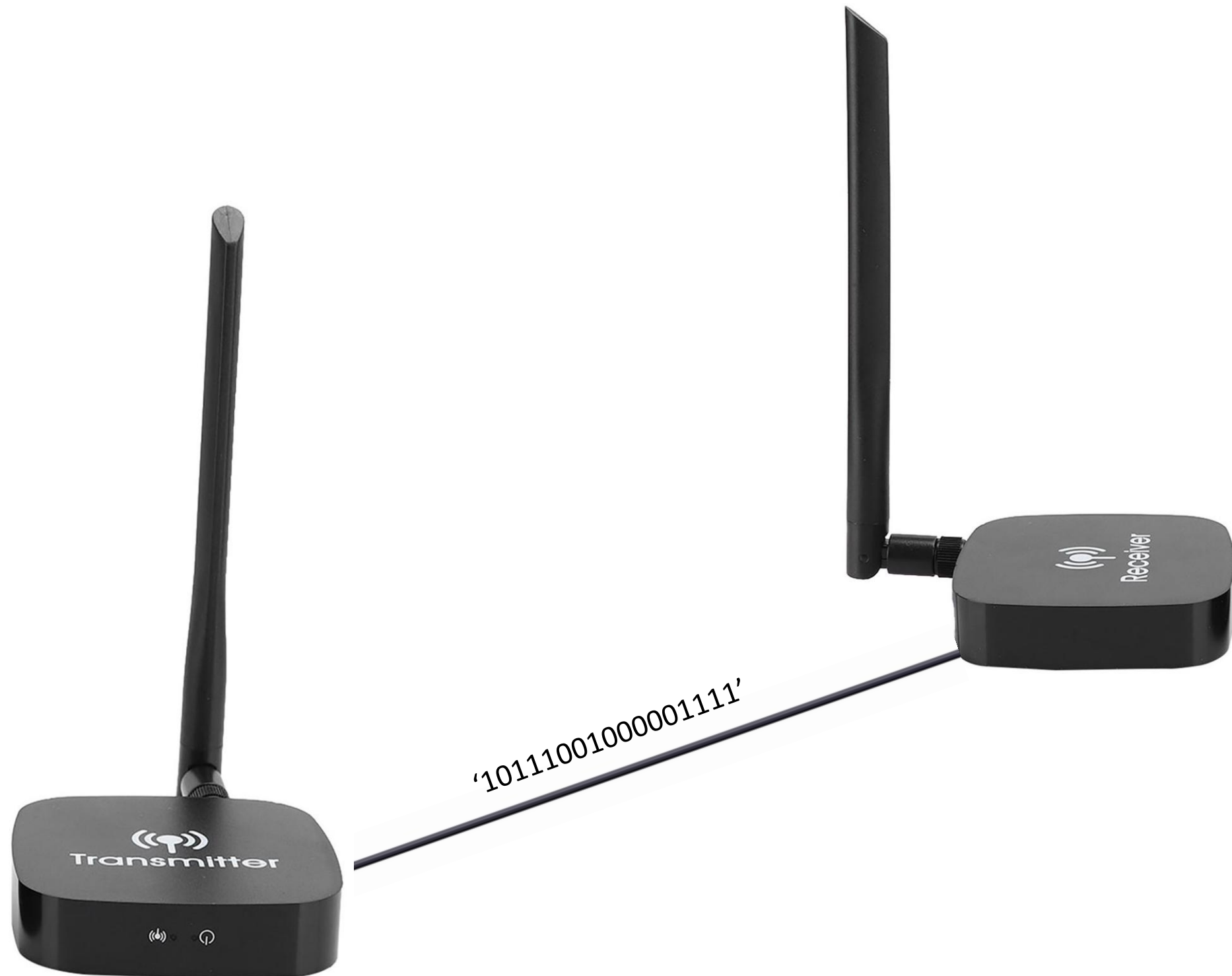
Comunicaciones



Transmisor y receptor



Comunicaciones cableadas



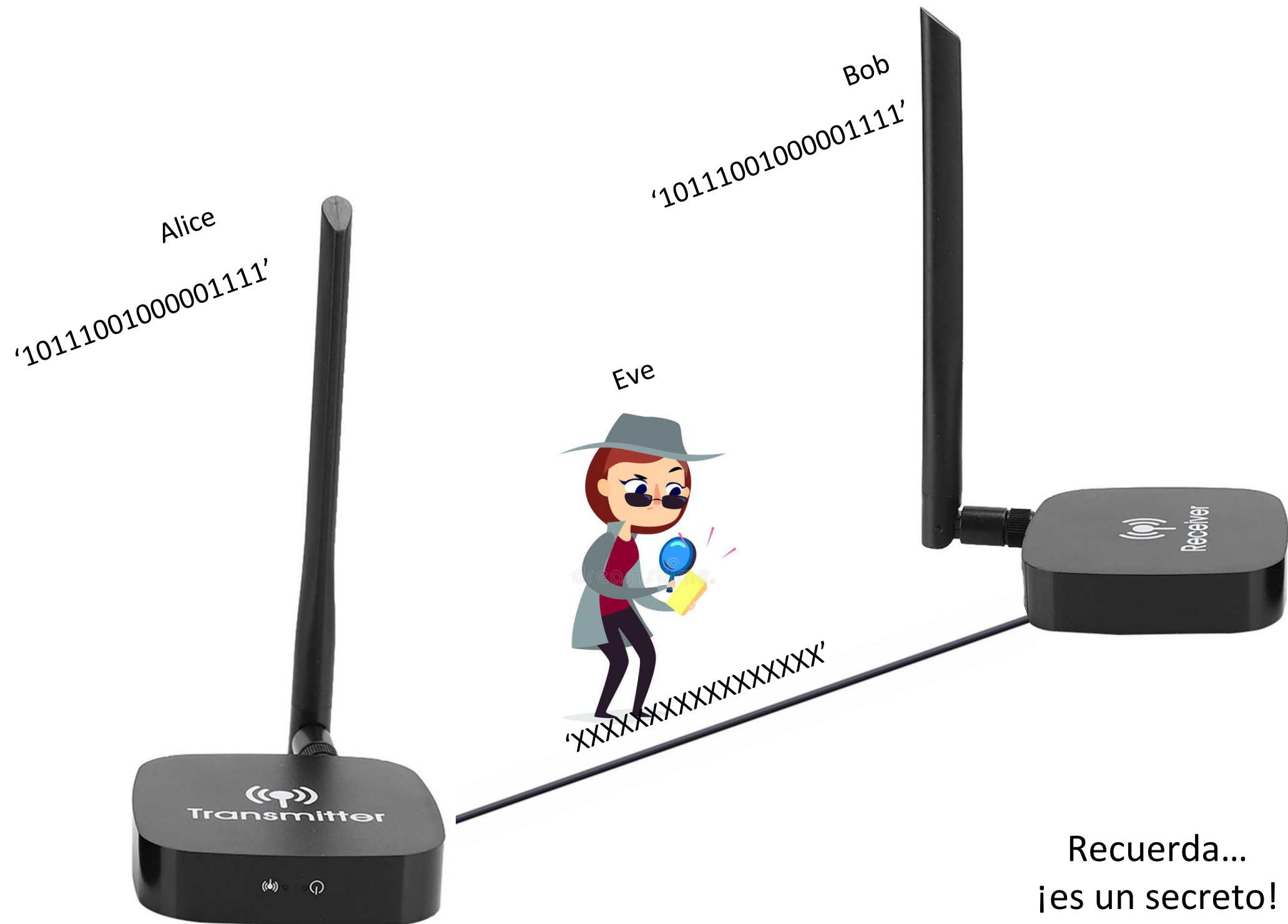
Canal de comunicaciones inalámbrico



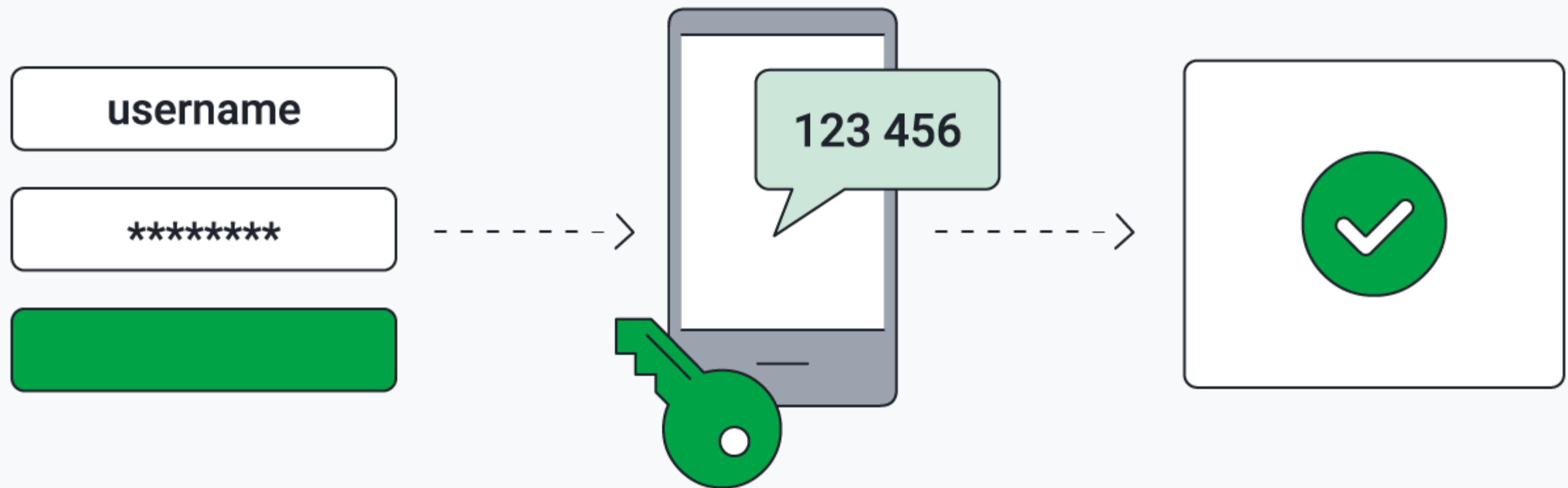
Mensaje y código



Secuencia para seguridad en las comunicaciones



Secuencia para seguridad en las comunicaciones



Secuencia para seguridad en las comunicaciones

- **Autenticación e intercambio de claves**

Como cuando entras a una fiesta y el guardia de seguridad te pide tu identificación para asegurarse de que estás invitado.

En el mundo digital, es el proceso de **verificar que eres quien dices ser al inicio** de cada o intercambio de mensajes. Esto se puede hacer mediante usuario/contraseña, mediante certificados digitales, etc.

A menudo, aquí se establece comparte información sobre el lenguaje que se usará para que nadie “entienda” el mensaje, es decir, para codificar la información posterior: claves de seguridad (**clave pública**).

- **Encriptación**

Como si escribieras un **mensaje en un código secreto** que solo tú y la persona a la que se lo envías pueden entender.

En el mundo digital, se usa para proteger la información mientras viaja por internet. Si alguien intenta espiar, solo verá un montón de letras y números sin sentido y no podrá formar las “palabras”, es decir, los mensajes completos.

- **Integridad de Datos**

Consiste en asegurarse de que el mensaje que envías llega sin cambios. Imagina que envías una carta y quieres estar seguro de que nadie la abre y cambia el contenido antes de que llegue a su destino.

En el mundo digital, se usan técnicas para **verificar que los datos no han sido alterados** durante la transmisión.

Comunicaciones globales y masivas



Retos actuales en las redes de comunicaciones...

- La **seguridad** y la protección de datos es crucial y es uno de los grandes retos en las próximas generaciones de redes de comunicaciones.
- La **capacidad** de la red, la **velocidad** en la transmisión y **latencia** (tiempo entre transmisión y recepción) son parámetros fundamentales y cada vez más complejos de optimizar. Las redes manejan grandes volúmenes de información a altas velocidades.
- **Redes híbridas** e Interoperabilidad. La integración de diferentes tecnologías y estándares puede ser complicada, especialmente con la llegada de nuevas tecnologías como 5G y el Internet de las Cosas (IoT).
- **Consumo** energético y la disponibilidad de materiales son factores cruciales que afectan la sostenibilidad, los costos y la viabilidad a largo plazo de las telecomunicaciones.

La Comunicación Cuántica puede jugar un papel fundamental a la hora de abordar estos retos en las redes de comunicaciones

Comunicaciones cuánticas



Las comunicaciones cuánticas utilizan los principios de la mecánica cuántica para transmitir información de forma más segura que cualquier método clásico.



Propone una transmisión de información de manera extremadamente **segura (confidencial), veloz y eficiente.**



Mientras que la **computación cuántica** se centra en aumentar la capacidad de procesamiento y resolver problemas ahora intratables, las **comunicaciones cuánticas** buscan mejorar la seguridad y eficiencia en la transmisión de datos



La cuestión fundamental a resolver en comunicaciones cuánticas seguras es la **distribución de claves cuánticas (QKD)**, que permite crear y compartir claves de cifrado seguras (claves privadas).



QKD requiere el uso de dos canales de comunicación: un **canal clásico** de alta velocidad (por ejemplo, Internet) y un **canal óptico cuántico.**

Principios de las comunicaciones cuánticas

- Se transmite información codificada en una serie de **qubits**
- La **superposición** permite que cada qubit pueda simultáneamente representar un “cero lógico” $|0\rangle$ y un “uno lógico”, $|1\rangle$. Es decir, los qubits pueden existir en múltiples estados a la vez, lo que **aumenta exponencialmente la capacidad** de procesamiento y transmisión de información.
- **Entrelazamiento** cuántico: Es un fenómeno donde dos partículas cuánticas se encuentran en estados correlacionados, de manera que el estado de una afecta instantáneamente al estado de la otra, sin importar la distancia que las separe. Esto permite la **teleportación, es decir**, la transferencia instantánea de información cuántica entre partículas sin necesidad de transmitir físicamente los qubits.
- El **principio de no clonación** de la mecánica cuántica garantiza que cualquier intento de interceptar o copiar un mensaje cuántico sea detectable, ya que **el simple acto de observarlo cambia su estado**.
- Los resultados de una medición cuántica **son intrínsecamente aleatorios**, lo que permite generar números realmente impredecibles (**QKD - QRNG**).

Quantum Key Distribution

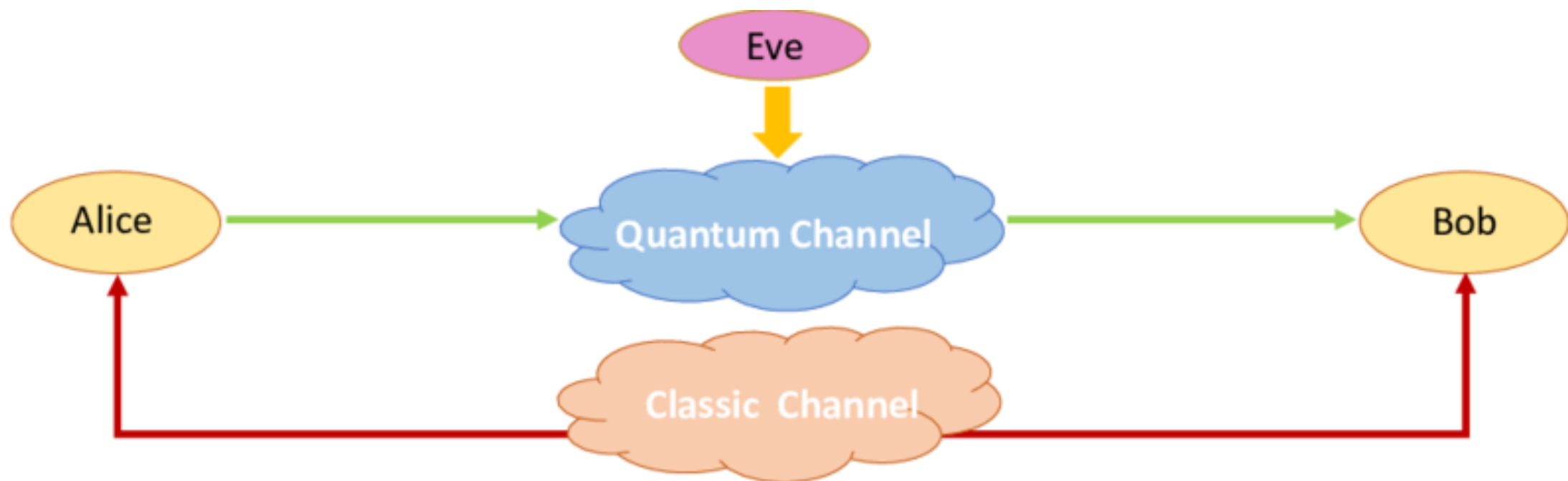
La cuestión fundamental a resolver en comunicaciones cuánticas seguras es la **distribución de claves cuánticas (QKD)**, que permite crear y compartir claves de cifrado seguras. El proceso es algo parecido a lo siguiente:

1. Alice transmite una información:

Genera fotones individuales y les asigna una polarización (o fase) que representa qubits (0 o 1).
Usa dos bases posibles (por ejemplo: rectilínea y diagonal).
Y envía por el canal cuántico estos qubits a Bob.

2. Bob recibe esa información:

Bob recibe los fotones y los mide, pero no sabe en qué base fueron preparados.
Elige aleatoriamente una base para cada fotón (la mitad de las veces coincide con la de Alice).



Hace falta un canal cuántico y un canal clásico

Quantum Key Distribution

La cuestión fundamental a resolver en comunicaciones cuánticas seguras es la **distribución de claves cuánticas (QKD)**, que permite crear y compartir claves de cifrado seguras. El proceso es algo parecido a lo siguiente:

3. Comparación de bases:

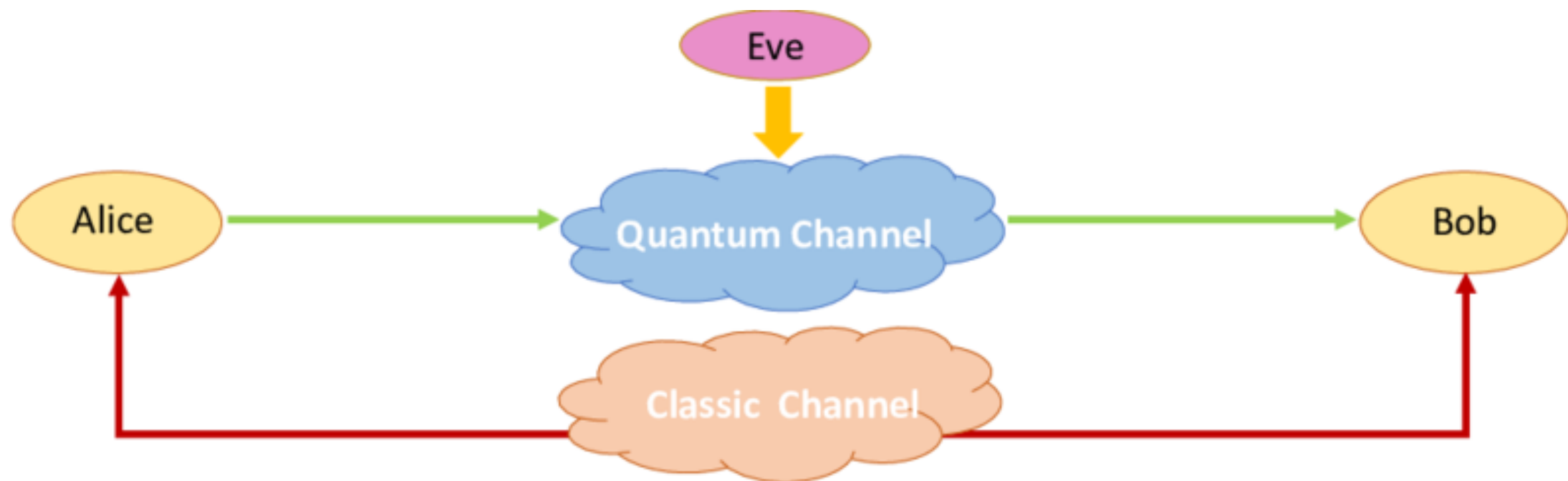
Ahora Alice y Bob se comunican por un **canal clásico** (por ejemplo, Internet).

No se envían quits sino metadatos.

Alice le dice a Bob en qué base codificó cada fotón (pero no revela el bit).

Bob le dice qué base usó para cada medición.

Se quedan solo con los casos en que coincidieron las bases, y descartan los demás.



Hace falta un canal cuántico y un canal clásico

Quantum Key Distribution

La cuestión fundamental por resolver en comunicaciones cuánticas seguras es la **distribución de claves cuánticas (QKD)**, que permite crear y compartir claves de cifrado seguras. El proceso es algo parecido a lo siguiente:

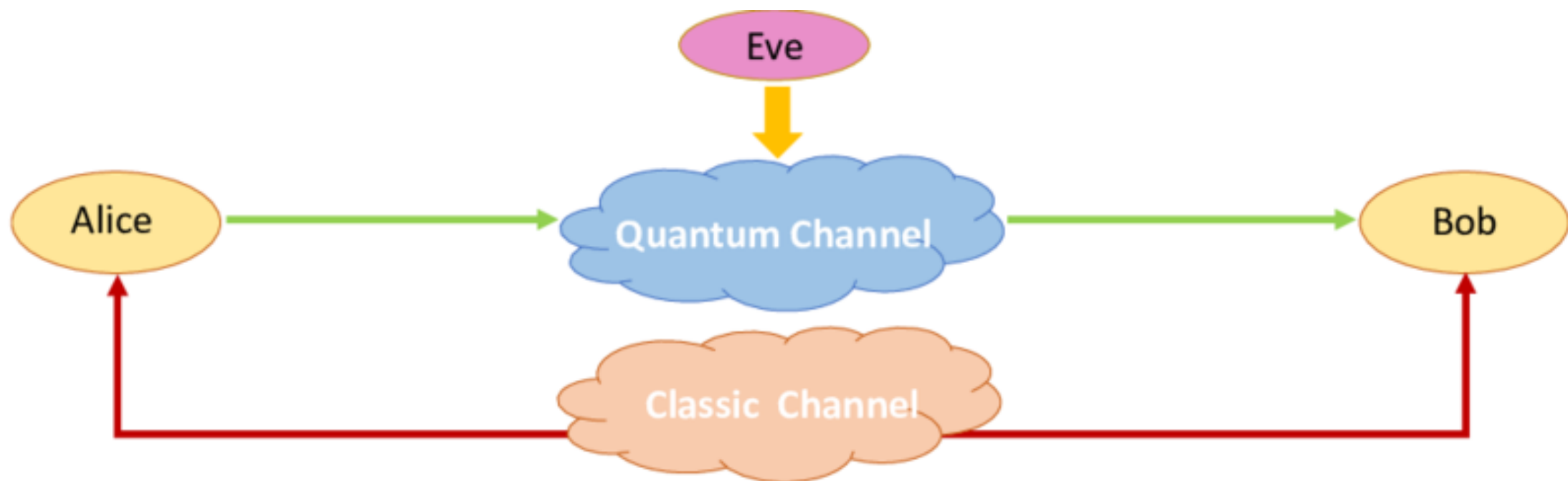
4. Generación y verificación de la clave compartida:

Usan los bits donde coincidieron las bases para formar una clave compartida.

Revelan públicamente (por el **canal clásico**) una parte aleatoria de la clave para comprobar la tasa de errores.

Si hay demasiados errores, sospechan de un espía (Eve) y abortan.

Si los errores están dentro de lo esperado, realizan mejoras en la seguridad (corrección de errores EC y privacidad ampliada PA).



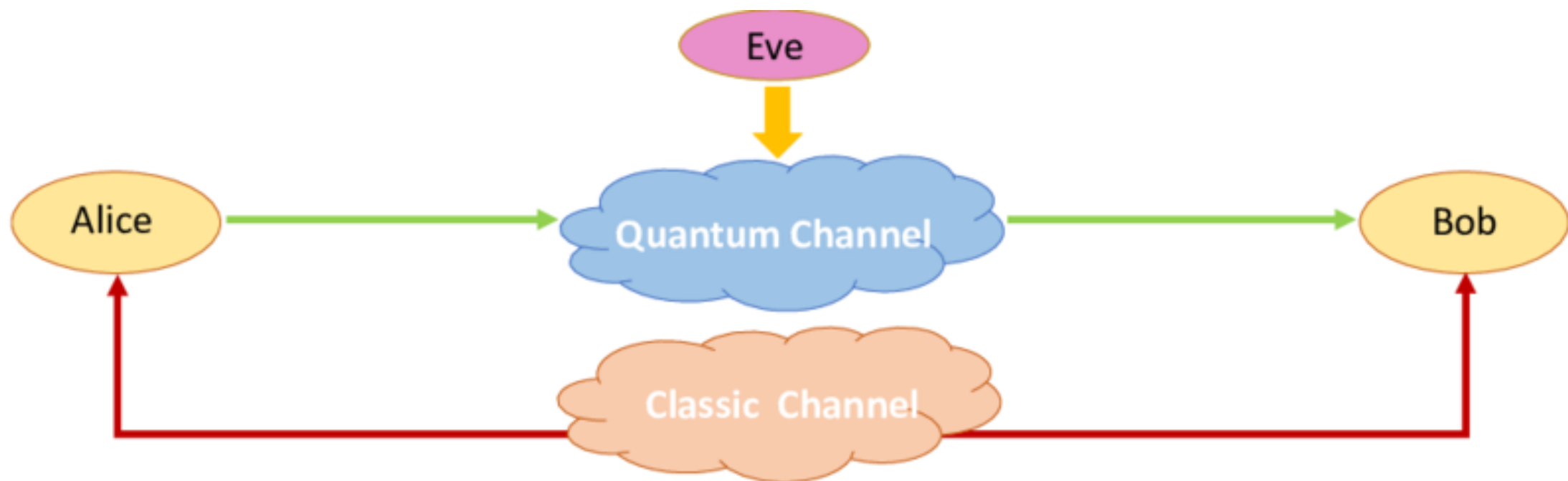
Hace falta un canal cuántico y un canal clásico

Quantum Key Distribution

La cuestión fundamental a resolver en comunicaciones cuánticas seguras es la **distribución de claves cuánticas (QKD)**, que permite crear y compartir claves de cifrado seguras. El proceso es algo parecido a lo siguiente:

5. Una vez que las claves están distribuidas, **la comunicación por el canal cuántico es segura.**

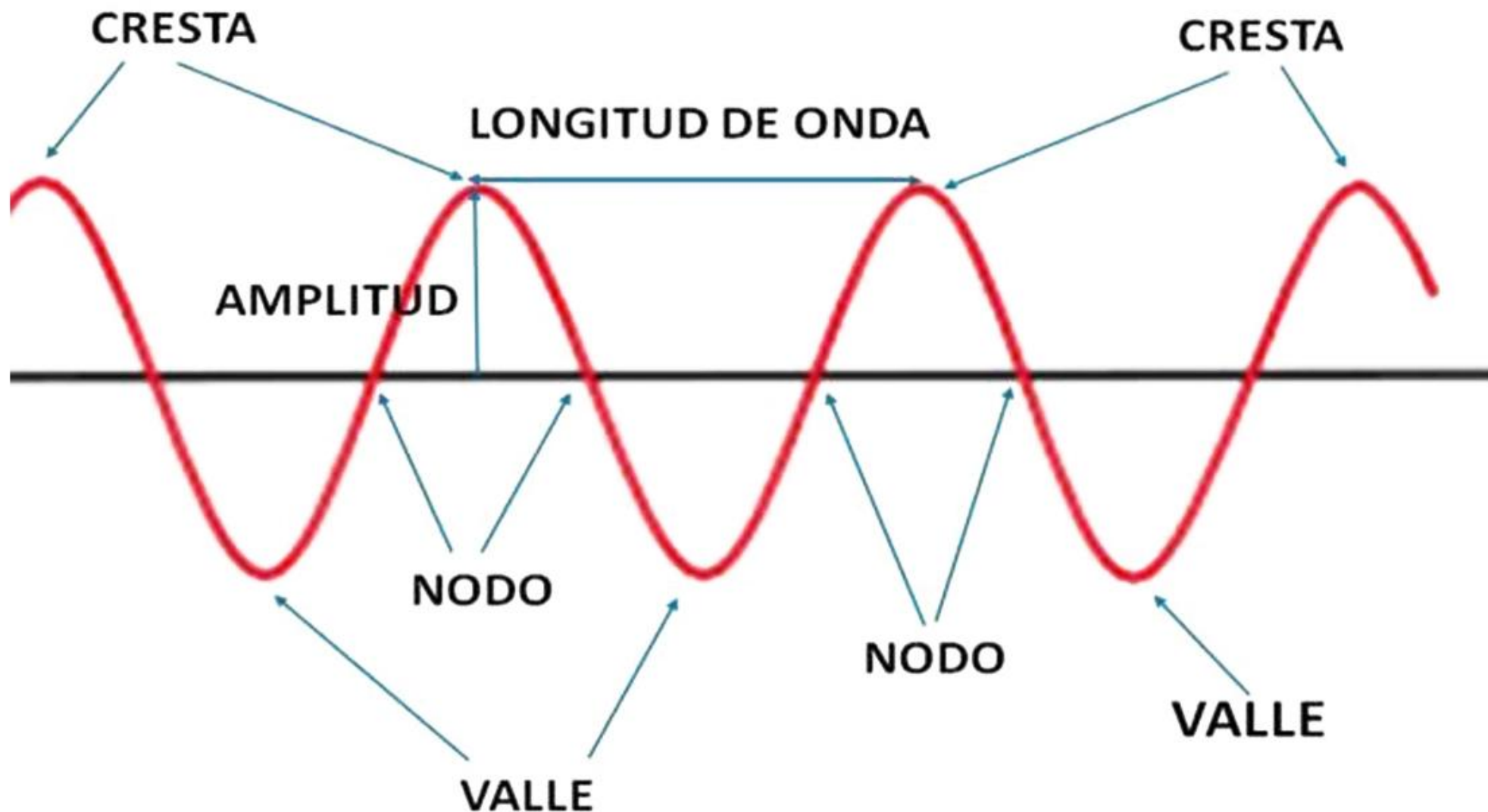
Es decir, Bob sabe detectar si Eve la ha observado/interceptado/clonado la información que Alice le envíe de ahora en adelante.



Hace falta un canal cuántico y un canal clásico

Modulación de la información

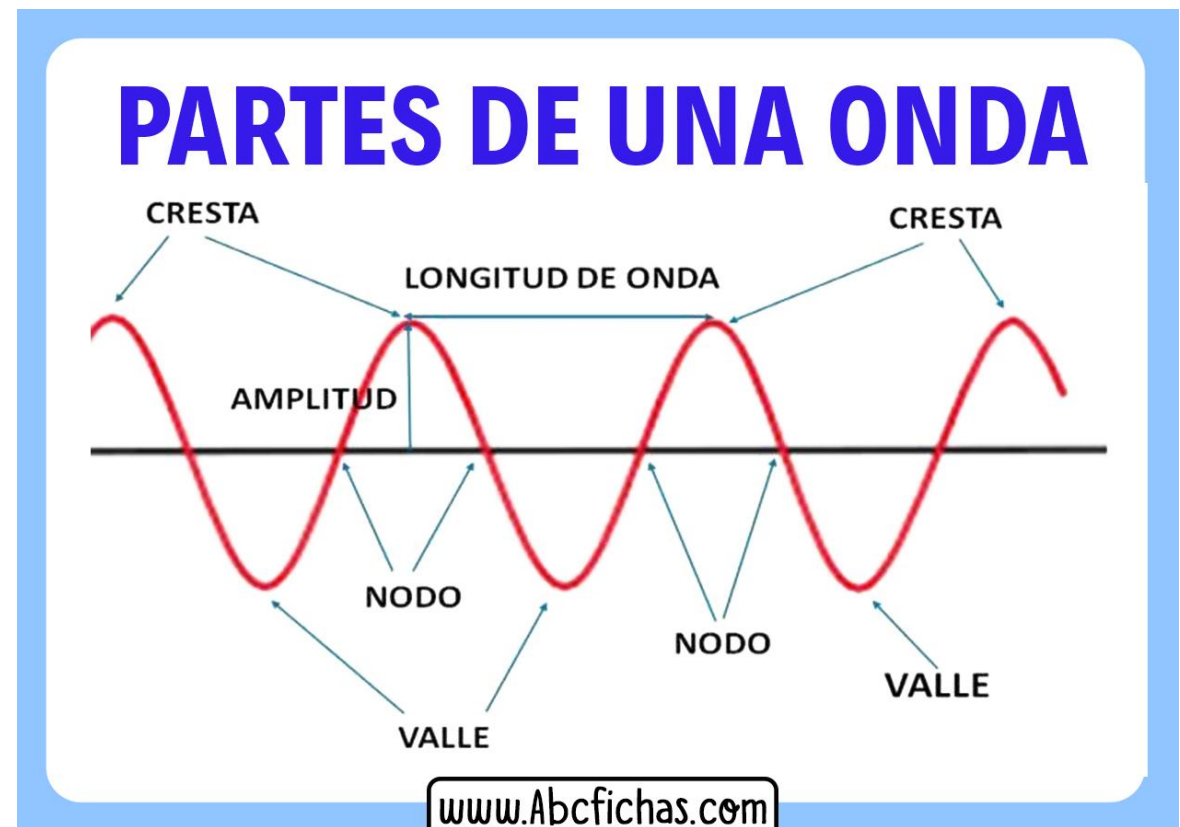
PARTES DE UNA ONDA



www.Abcfichas.com

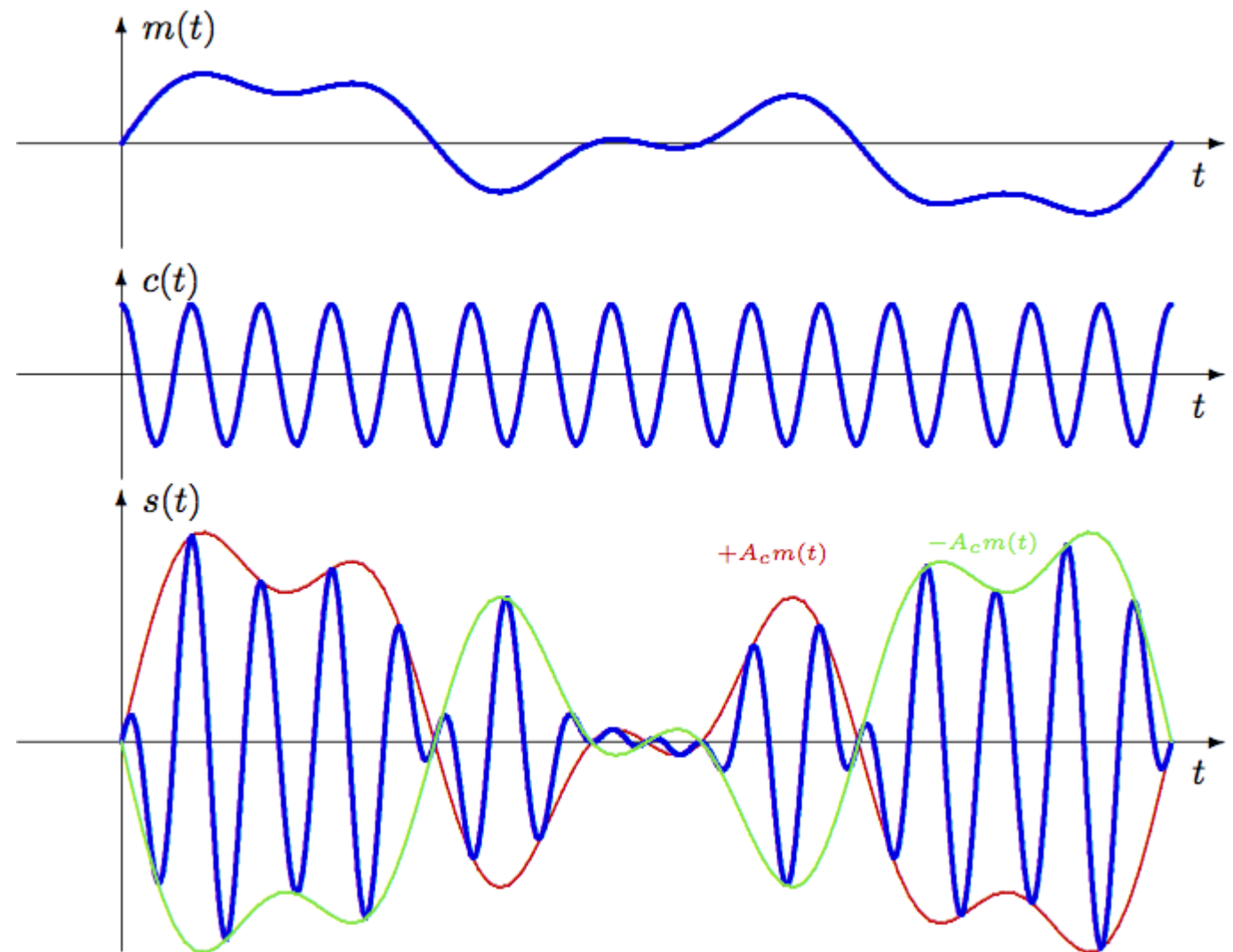
Modulación de la información

- La **amplitud** (A) es la distancia de la cresta o valle de la onda a la línea de valor medio.
- La **frecuencia** (f) es el número de oscilaciones o de longitudes de onda que se propagan en un segundo. La frecuencia se mide en una unidad denominada hertzio (Hz).
- La **longitud de onda** (λ) es la distancia que separa dos puntos equivalentes de la onda.
- El **periodo** de oscilación de una onda (T) es el tiempo que transcurre desde que la onda pasa por un punto hasta que vuelve a pasar por un punto equivalente.



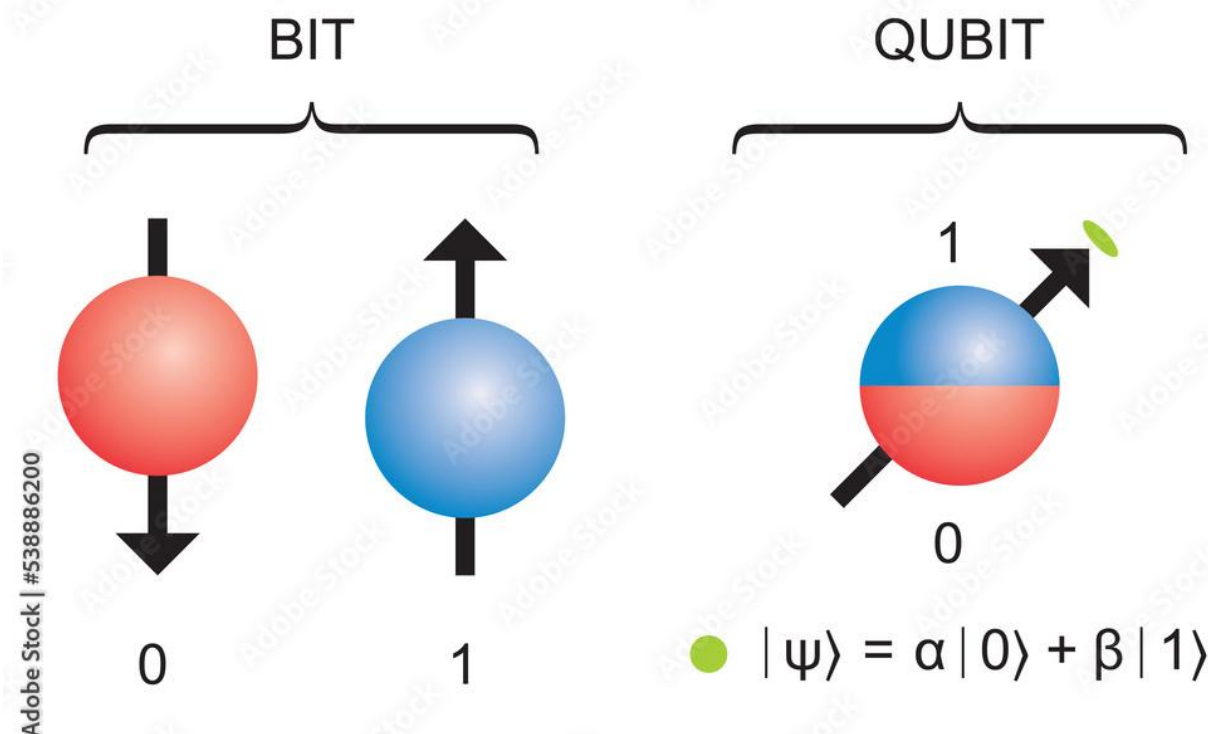
Modulación de la información

- **¿Cómo se “mete” la información en ondas, tanto si es cableada como inalámbrica?**
- La modulación de la información es el proceso mediante el cual se modifica una señal portadora (una onda electromagnética) para incorporar los datos que serán transmitidos.
- En las comunicaciones clásicas:
 - Modulación de Amplitud (AM)
 - Modulación de Frecuencia (FM)
 - Modulación de Fase (PM)
 - Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK)
 - Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK)
 - Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK)
 - Modulación en Cuadratura (QAM)
 - etc.



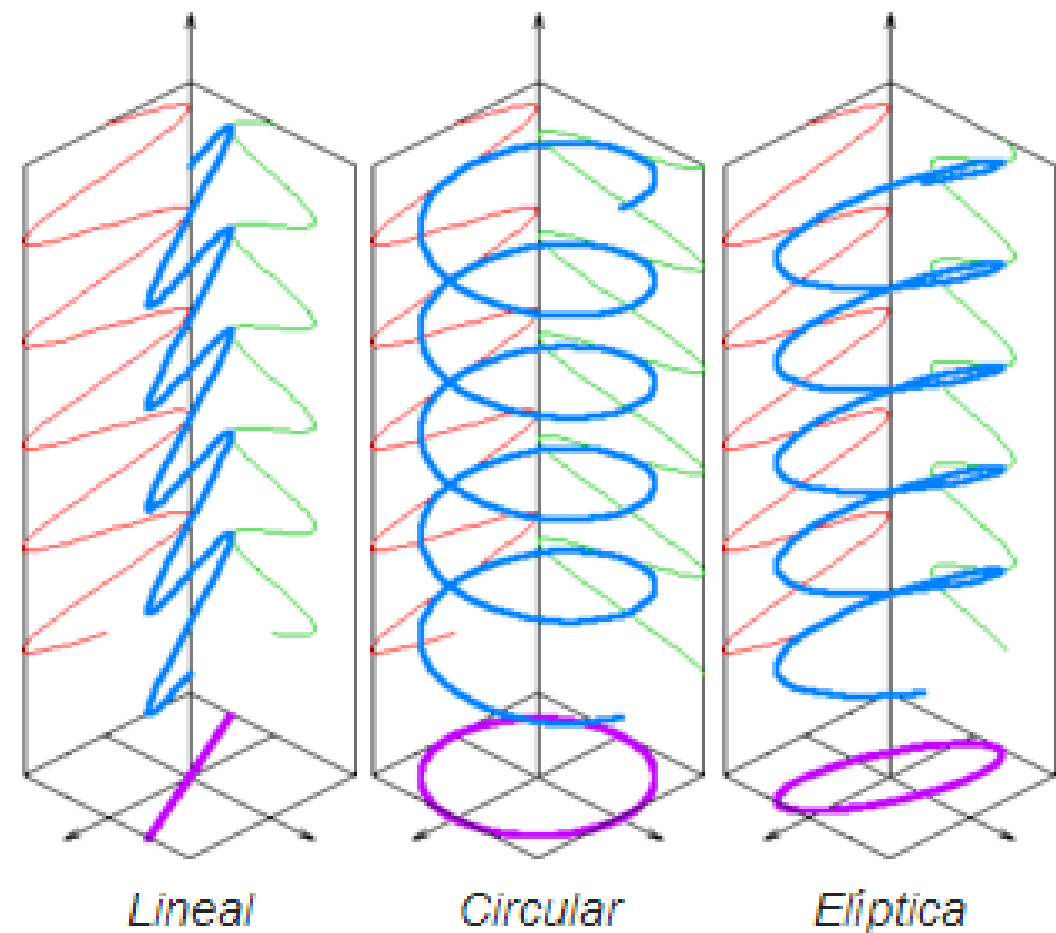
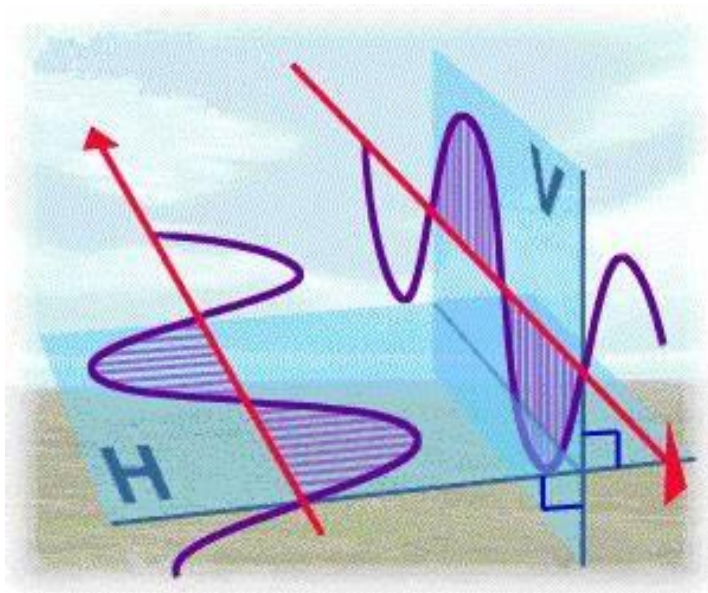
Modulación cuántica

- ¿Cómo se “mete” la **información cuántica en ondas**, tanto si es cableada como inalámbrica?
- En comunicaciones cuánticas la información se envía utilizando “ondas de luz”, y la información se codifica en partículas de luz (fotones).
- QKD necesita dispositivos y canales basados en componentes optoelectrónicos.
- Si bien se pueden modular la amplitud, la fase o la frecuencia como en comunicaciones clásicas, en cuánticas típicamente se modulan la **polarización** o la **fase relativa**. También los estados de entrelazamiento.



Modulación cuántica en polarización

- La polarización de un fotón se refiere a la orientación de las oscilaciones de su campo eléctrico.
- Se pueden usar diferentes bases para describir esta polarización. Por ejemplo:
 - Base Rectilínea: $\rightarrow$ (horizontal = $|0\rangle$), $\uparrow$ (vertical = $|1\rangle$)
 - Base Diagonal: $/$ (45°), $\backslash$ (135°)
- Es habitual en DV-QKD y es la más común en BB84.
- Por ejemplo, con bits clásicos:
un bit 0 se puede codificar como un fotón polarizado horizontalmente,
mientras que un bit 1 se codifica como
un fotón polarizado verticalmente

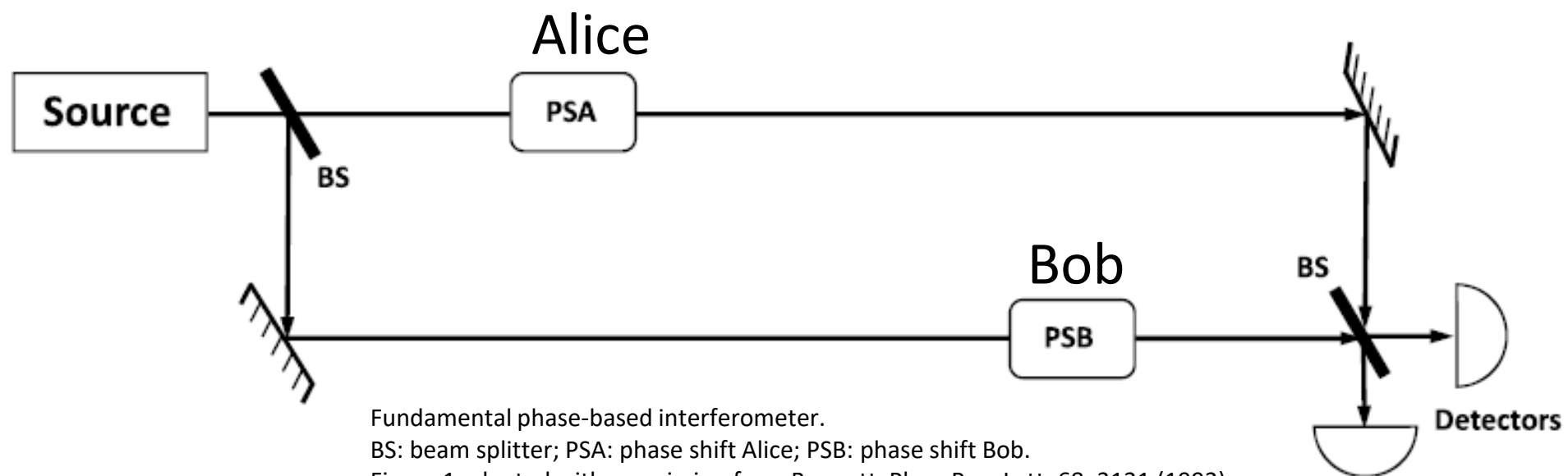


Modulación cuántica en fase

- Un qubit puede estar en una superposición de los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$ con una fase relativa ϕ , representada como:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\phi} \sin(\theta/2)|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle).$$

- Por ejemplo:
 - $|0\rangle$ = sin desfase, $|1\rangle$ = con un desfase de $\phi = \pi$ (180°)
- La fase ϕ , por ejemplo, se puede representar con la fase electromagnética relativa entre los brazos superior e inferior de un interferómetro y se crea una **interferencia constructiva o destructiva** que codifica la información:



Fundamental phase-based interferometer.

BS: beam splitter; PSA: phase shift Alice; PSB: phase shift Bob.

Figure 1 adapted with permission from Bennett, Phys. Rev. Lett. 68, 3121 (1992)

Copyright 1992 by the American Physical Society.

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.68.3121>

Tipos de QKD

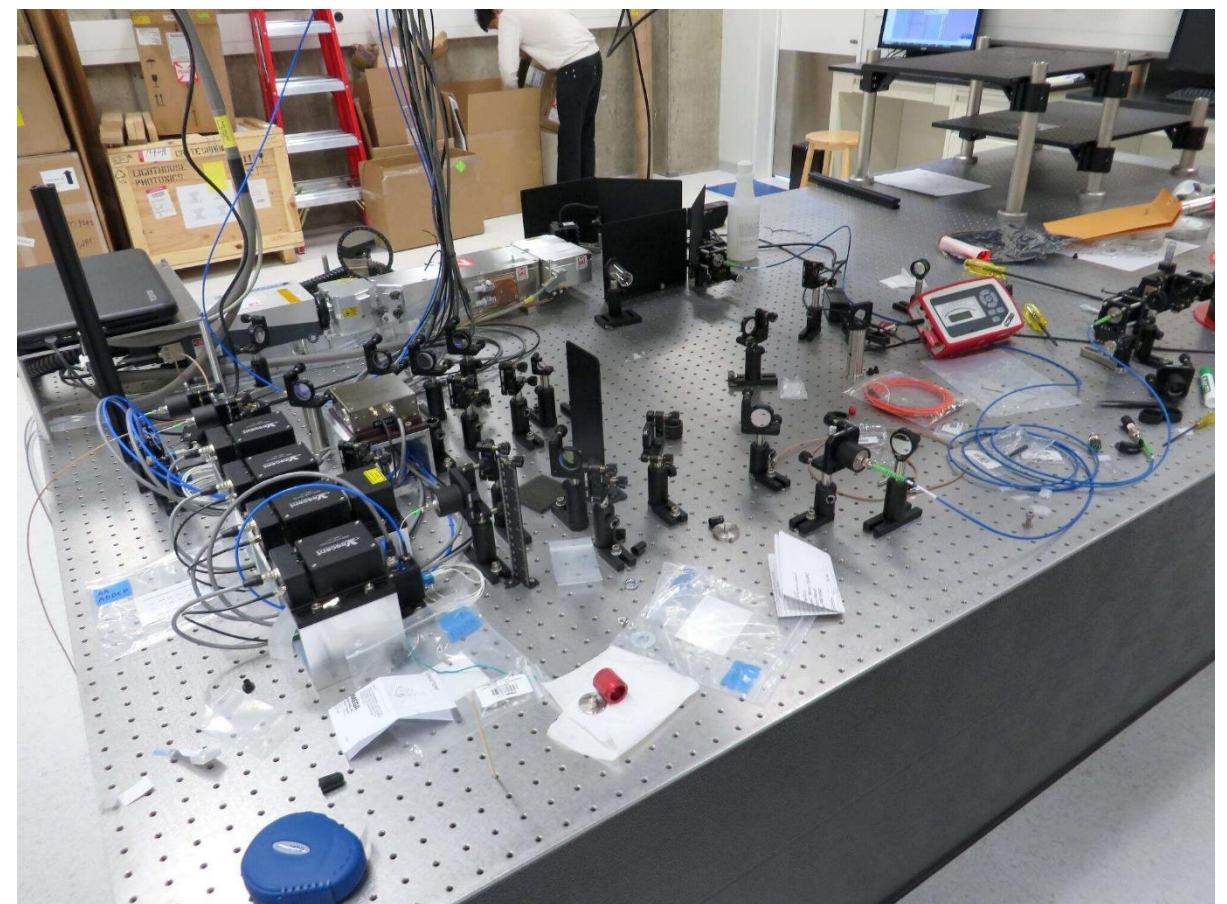
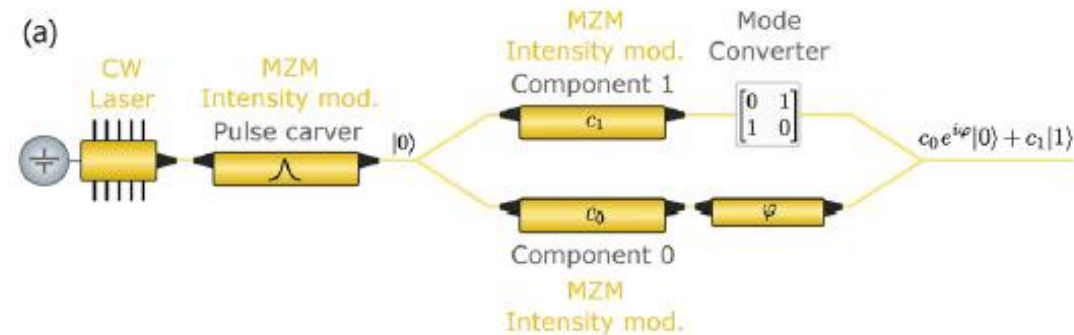
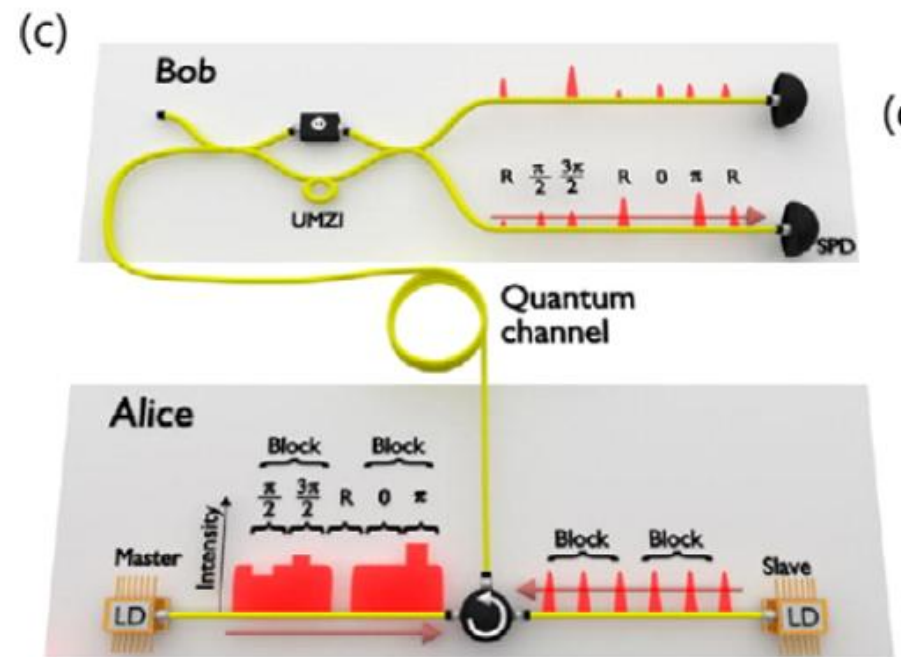
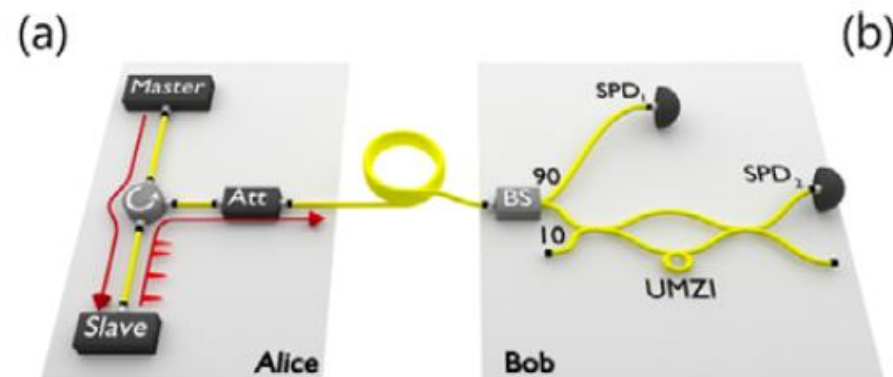
Discrete variable, DV-QKD

- Los qubits se codifican en elementos discretos, es decir, en fotones individuales.
- Casi siempre es modulación en la polarización.
- Se necesitan entonces “single photon emitters” (SPE) y count detectors, que son elementos muy complejos de fabricar.
- También se llaman “prepare and measure protocols”
- No hay estados entrelazados
- Comenzó a investigarse en los años 70s en estos protocolos, son de los más explorados
- Tipos: BB84, B92, COW, DPS, ...

Continuous Variable, CV-QKD

- Los qubits se incorporan en una onda de luz continua, casi siempre en su amplitud o su fase.
- Se utiliza detección homodina o heterodina para recuperar continuamente el valor de los cuadrantes de la luz. Esto hace que la detección sea algo más compleja.
- Son tecnologías más parecidas a las comúnmente utilizadas para comunicaciones ópticas clásicas.
- Tipos: Gaussianos, MDI, TF, etc.

Ejemplos QKD



Paraíso, T.K., Woodward, R.I., Marangon, D.G., Lovic, V., Yuan, Z. and Shields, A.J. (2021), Advanced Laser Technology for Quantum Communications (Tutorial Review). Adv. Quantum Technol., 4: 2100062. <https://doi.org/10.1002/qute.202100062>

Abellán Sánchez, C. Quantum random number generators for industrial applications. Tesis doctoral, UPC, Institut de Ciències Fotòniques, 2018. DOI 10.5821/dissertation-2117-120989 . Disponible en: <<http://hdl.handle.net/2117/120989>>

estefania.priorcano@uclm.es

5 mm



Optoelectrónica

Optoelectrónica

- La optoelectrónica es una rama de la electrónica que se ocupa de dispositivos que **convierten señales eléctricas en luz y viceversa**.
- Trabaja con electrones y fotones “a la vez”, es decir, luz y electricidad.
- Se basa en el efecto fotoeléctrico, que consiste en la emisión de electrones por un material al incidir sobre él partículas de luz. Fue descubierto por Hertz en 1887 y explicado por Einstein en 1905 (por esto ganó el Nóbel de Física en 1921)

El mercado de la optoelectrónica crece cada año en todo el mundo. Los dispositivos optoelectrónicos son esenciales en muchos sistemas de seguridad (imágenes de infrarrojos, sensores de movimiento, etc) pero también se extienden a todos los aspectos de nuestra vida cotidiana, incluyendo los campos de la iluminación, la generación de energía, los sistemas de comunicación, la vigilancia del medio ambiente, la salud, etc.

<https://granrevoluciondelaelectronica.usal.es/optoelectronica/>

Óptica y fotónica

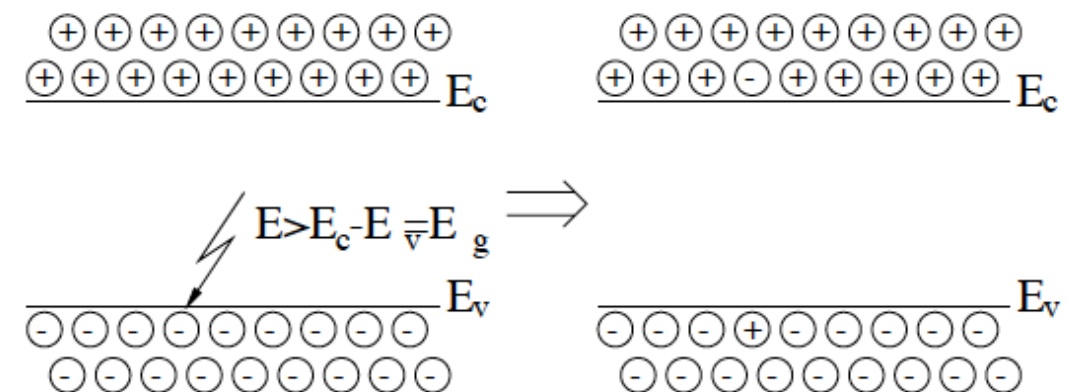
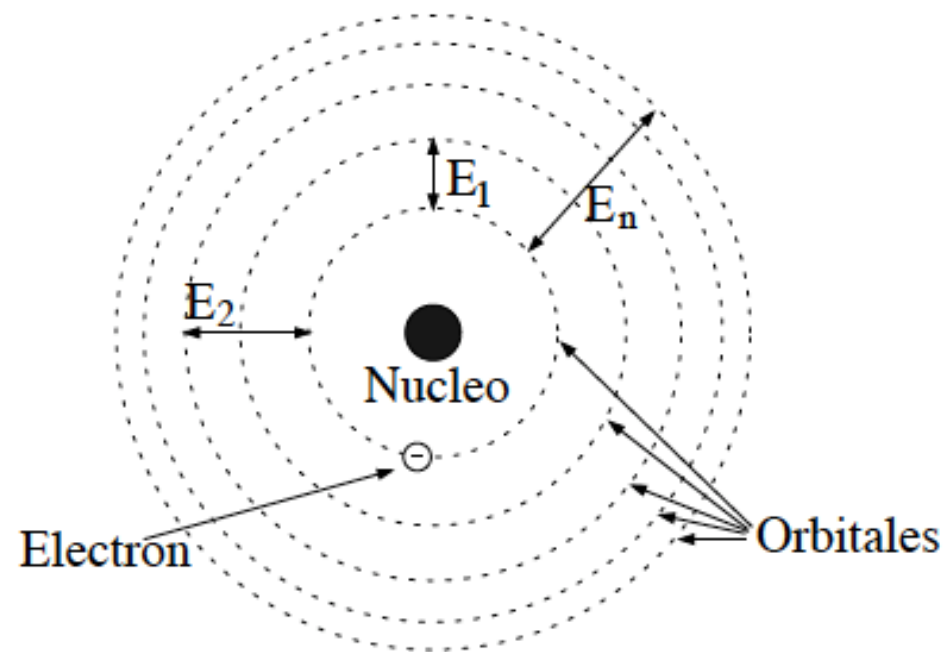
- La óptica, que estudia el comportamiento y las propiedades de la luz, cómo interactúa con la materia, como detectarla, modificarla.
 - La **óptica** es la ciencia que trabaja con la luz “como si fuera un chorro”
- La fotónica es la ciencia de la generación, control y detección de fotones. Los fotones son las partículas que forman las ondas.
 - La **fotónica** es la ciencia que trabaja con la luz “como si fueran gotas”
- Aplicaciones
 - Comunicaciones ópticas, medicina, Imágenes, Energía, Sistemas de detección y vigilancia, como los sensores LIDAR utilizados en vehículos autónomos, electrónica de consumo, cuántica, etc.
- Charla: “La fotónica en nuestras vidas”, Dra. Ana Quirce:

<https://www.youtube.com/watch?v=zeRNWV2xyYs&list=PLtLog61EkhOHovb-t4jpRbimIXMbNEtkl&index=40>

Efecto fotoeléctrico

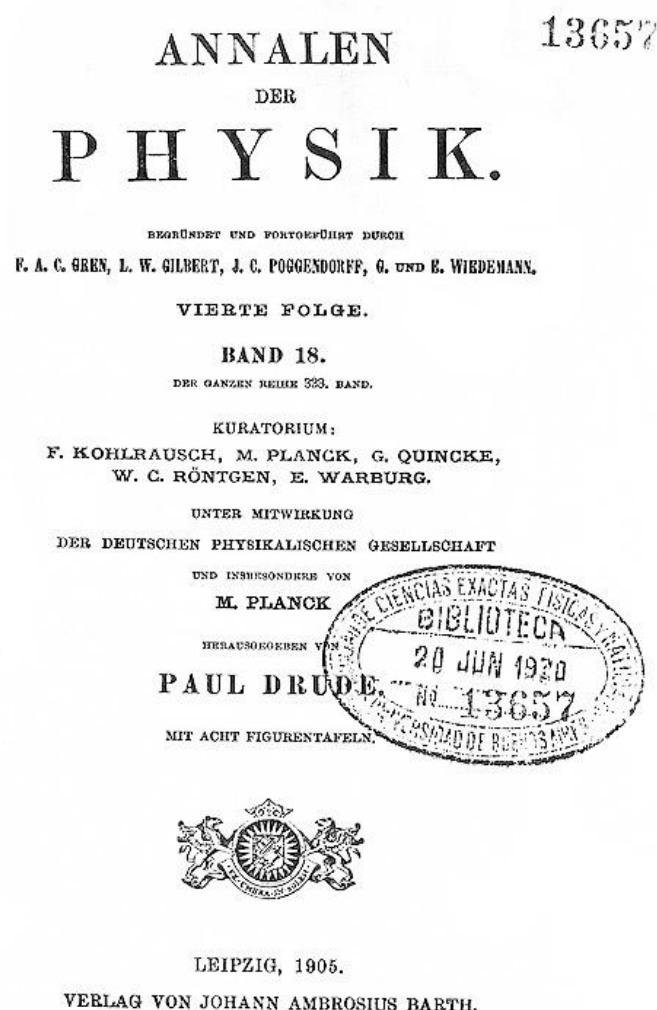
- El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material al incidir sobre él partículas de luz.
- En esto se basan los componentes optoelectrónicos y la optoelectrónica.

<https://www.youtube.com/watch?v=5CLj9uJPQKg>



Efecto fotoeléctrico

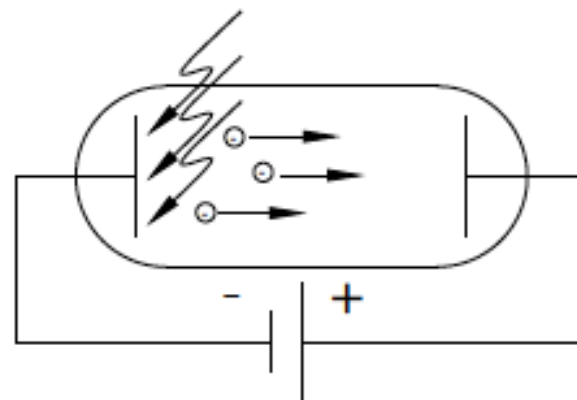
- El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz, en 1887.
- Albert Einstein publicó en 1905 un artículo en el que daba una explicación sencilla del efecto fotoeléctrico. Por esta explicación recibiría el Premio Nobel de Física en 1921.
- Esto implicaba que partículas discretas de luz podían generar el efecto fotoeléctrico y también mostró la presencia de una **frecuencia característica para cada material** por debajo de la cual no se producía ningún efecto.



Heurística de la generación y conversión de la luz

(über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt),

A. Einstein, Annalen der Physik 17, 132 (1905)



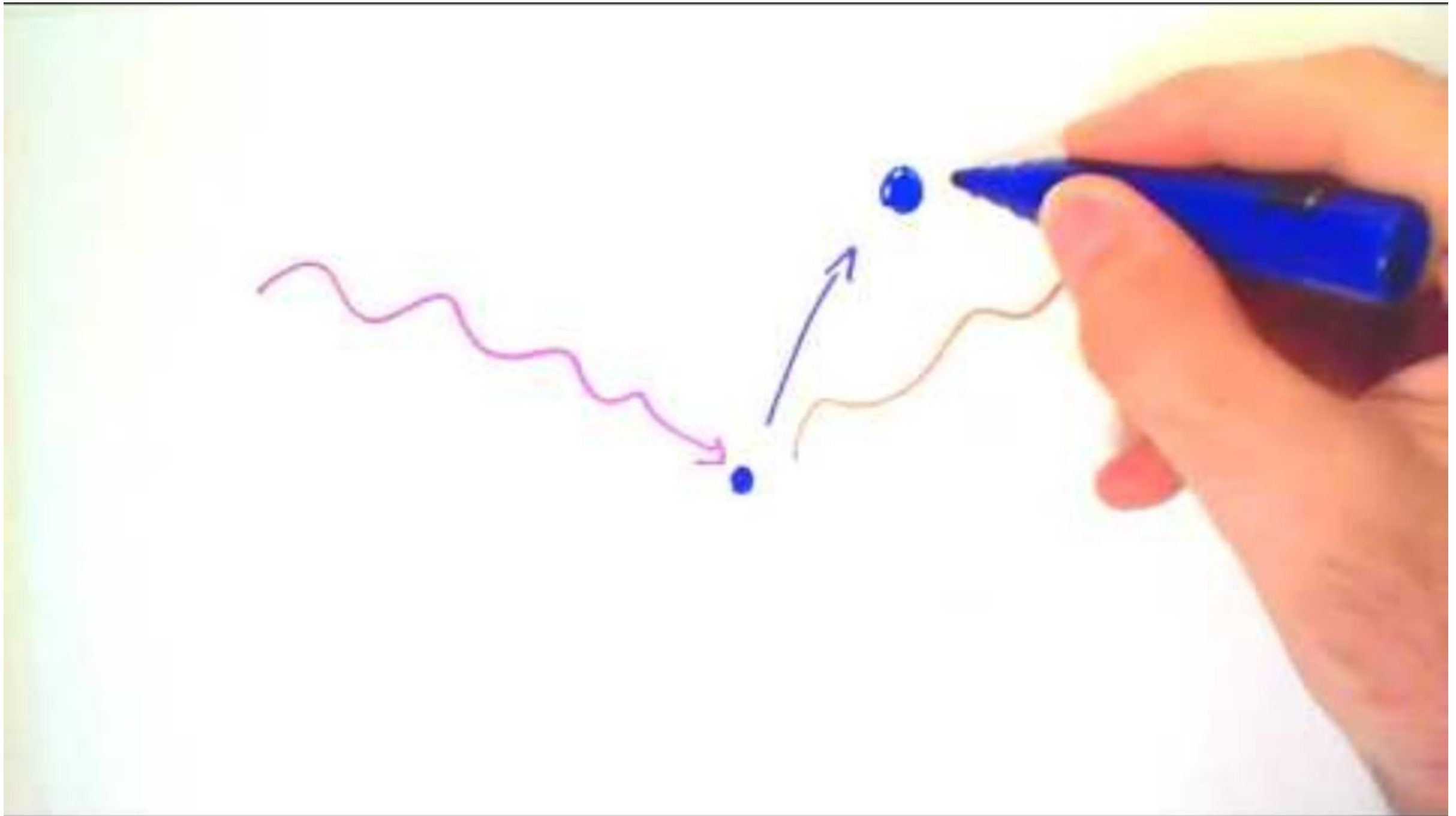
$$E = h\nu$$

$$e = v \cdot t$$

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$$

Efecto fotoeléctrico

<https://www.youtube.com/watch?v=wj9FRoiRHYc>



Optoelectrónica

- **Dispositivos optoelectrónicos**

- Capaces de transformar señales electrónicas en ópticas o viceversa.

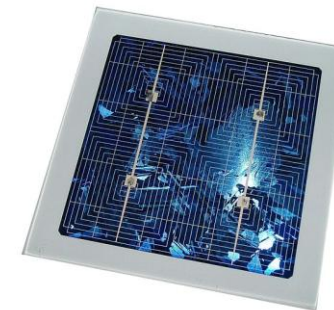
- **Emisores (transforman señales electrónicas en ópticas).**

- LEDs
- Láser
- Lámparas (incandescentes y halógenas)
- Single photon emitter



- **Sensores (transforman señales ópticas en electrónicas).**

- Fotorresistencias
- Fotodiodos
- Fototransistores
- Células solares
- Count detectors



- **Otros**

- Amplificadores, interferómetros, atenuadores, circuladores, filtros, etc

Emisores de luz

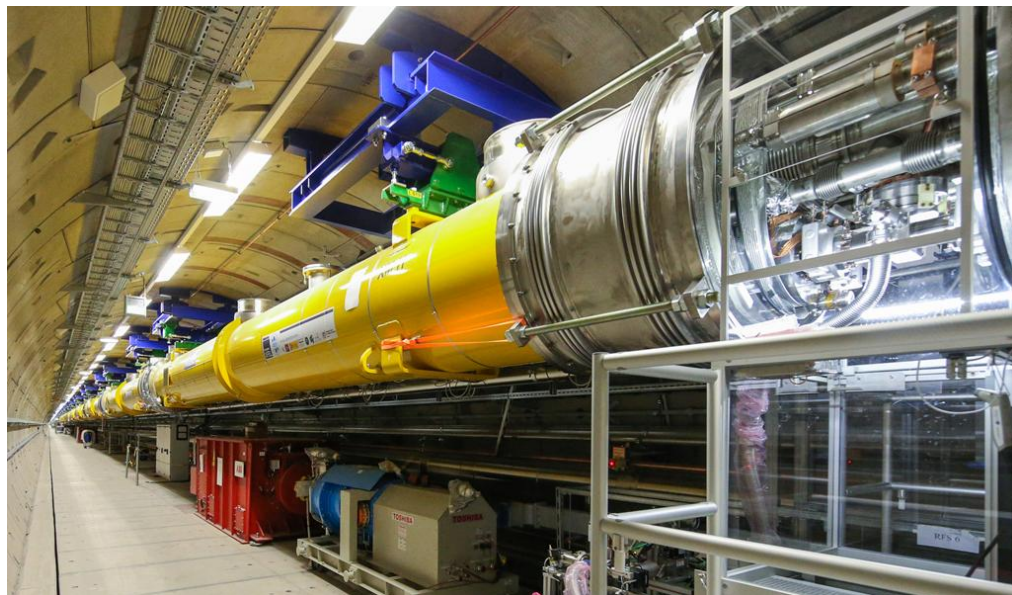
Emisores

- Transforman señales electrónicas en ópticas.

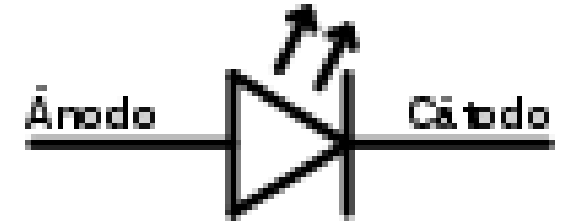
1. LEDs
2. Láser
3. Lámparas (incandescentes y halógenas)
4. Single photon emitters



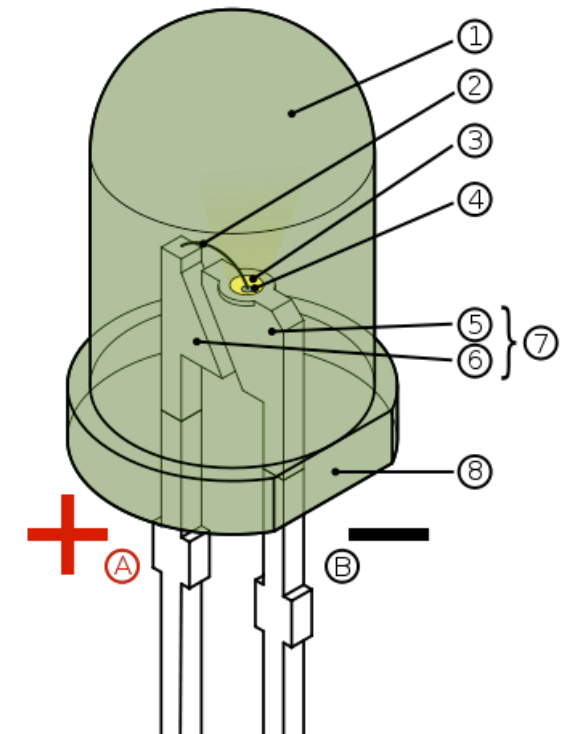
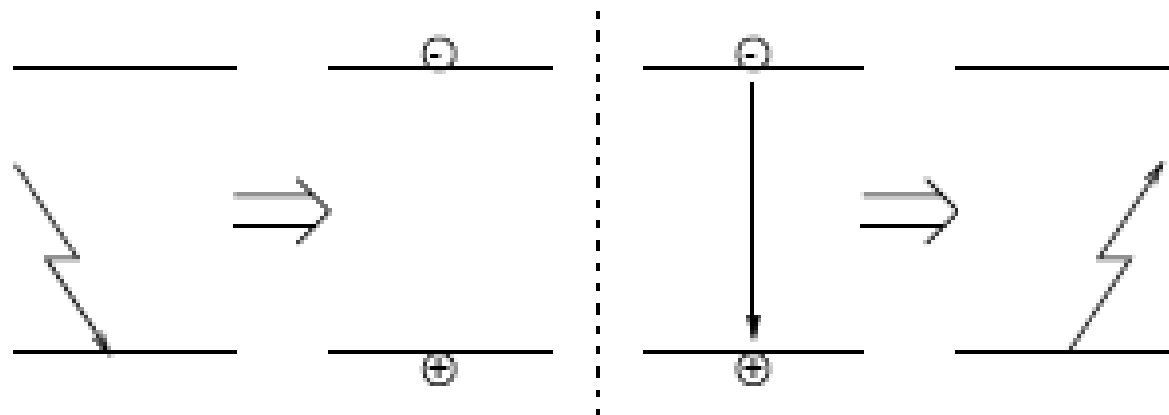
Curso en LED y LASERs: <https://www.youtube.com/watch?v=IEju3AT1olk&list=PLgwJf8NK-2e4iGfcV1Jz81dF6sXk5LIT3>



LED

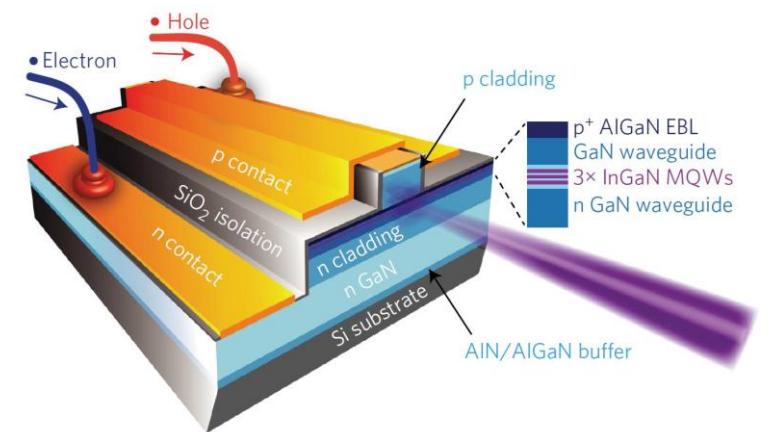
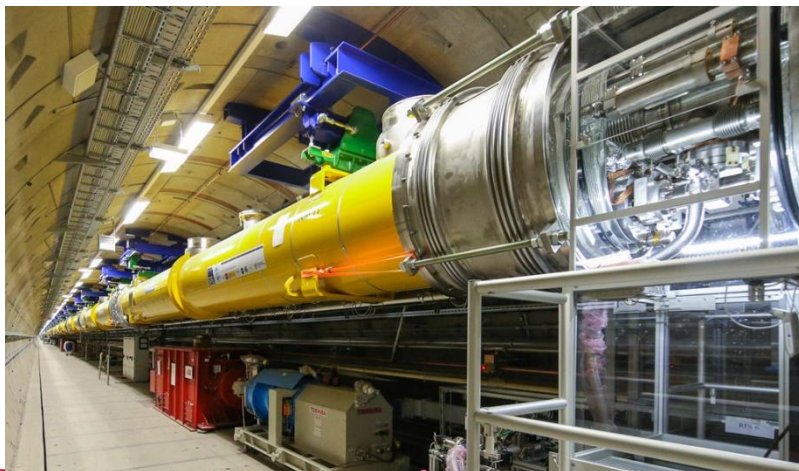


- Un LED (Light Emitting Diode) es un diodo que emite luz cuando una corriente eléctrica pasa a través de él.
- La luz se produce mediante un proceso llamado **electroluminiscencia**, donde los electrones se recombinan con huecos en el material semiconductor, liberando energía en forma de fotones.
- Los LEDs son conocidos por su eficiencia energética y larga vida útil, y se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde iluminación general hasta pantallas electrónicas
- Color en función de energía requerida
- Bajo consumo, pequeño tamaño, gran durabilidad y fiabilidad

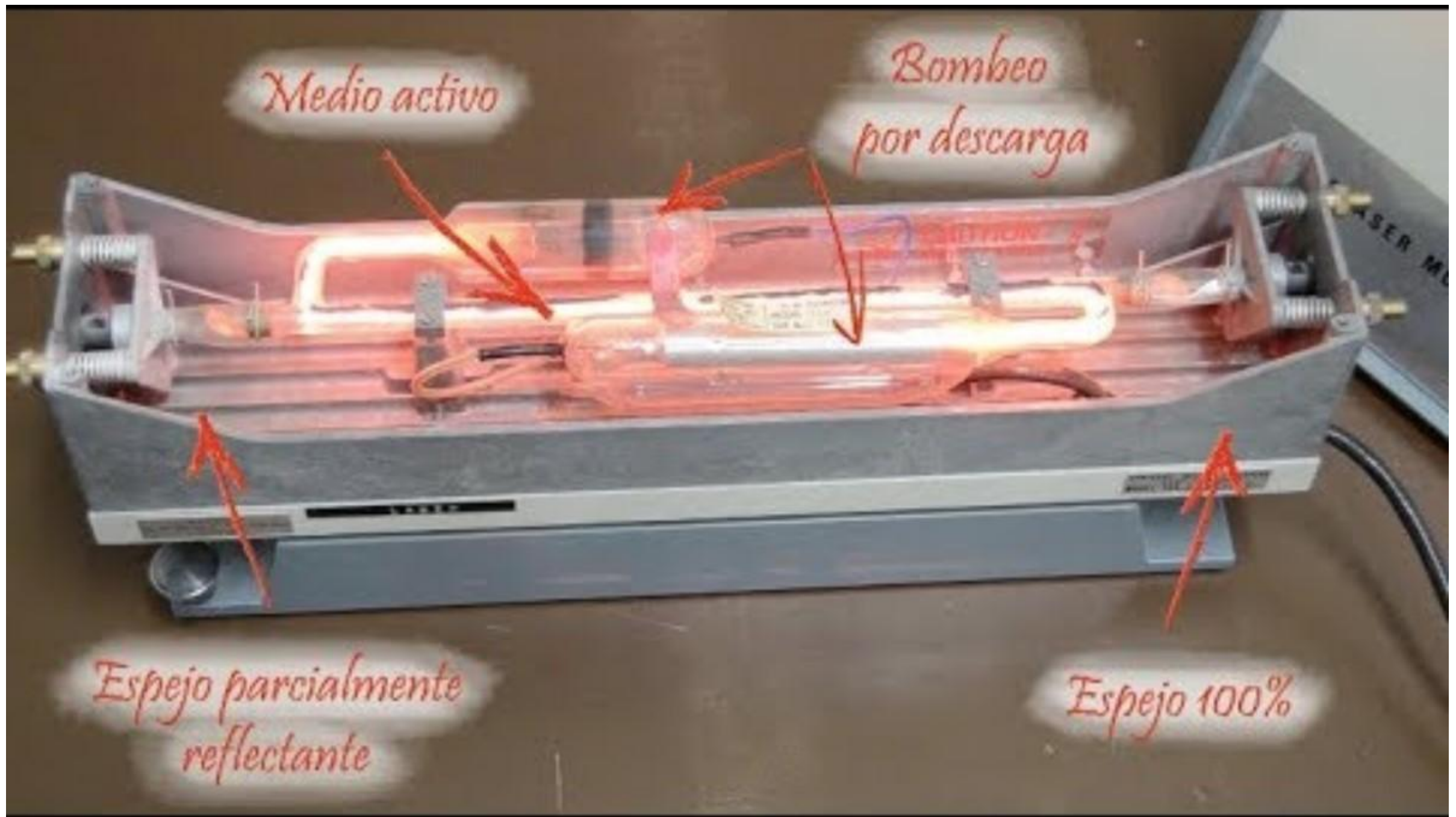


LASER

- LASER significa **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation.
- Un láser emite luz gracias a la emisión estimulada, es decir, un fotón que incide en un electrón y lo libera, produce además otro fotón con igual frecuencia y fase que el incidente.
- Así con una inversión grande de portadores para generar muchos fotones, se consigue un haz de luz **coherente y monocromática**.
- Este componente ha sido clave para el desarrollo de numerosas aplicaciones. Se utilizan en aplicaciones que requieren precisión y alta intensidad, como en la medicina, las telecomunicaciones y la industria.
- Los láseres pueden emitir luz visible o invisible (infrarroja o ultravioleta).
- Hay infinidad de tipos diferentes de láseres.



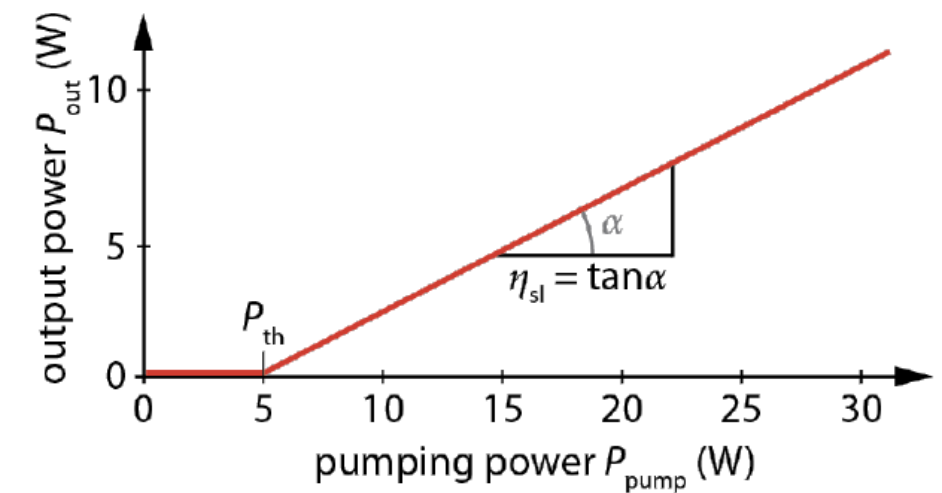
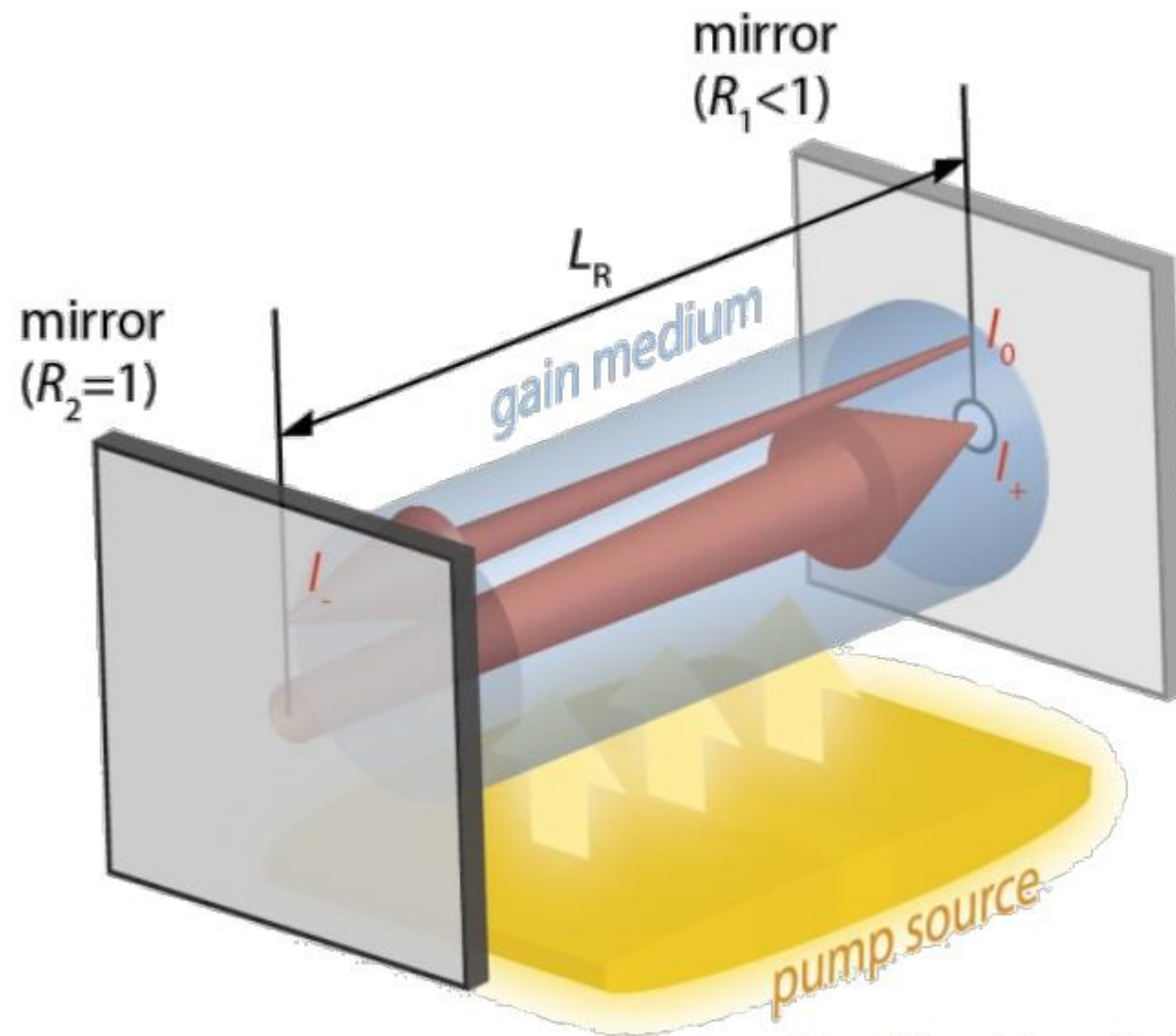
LASER



<https://www.youtube.com/watch?v=8UbnJ3b8YzY>

LASER

The laser oscillator is the combination of the gain medium and the resonator:



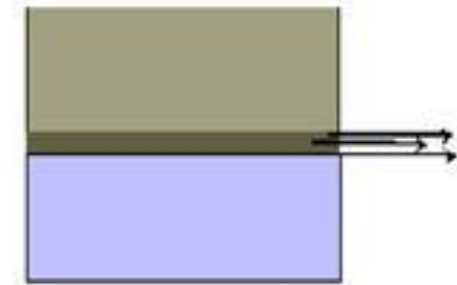
Resulting intensity inside the resonator: $I = I_+(z) + I_-(z)$

LASER vs. LED

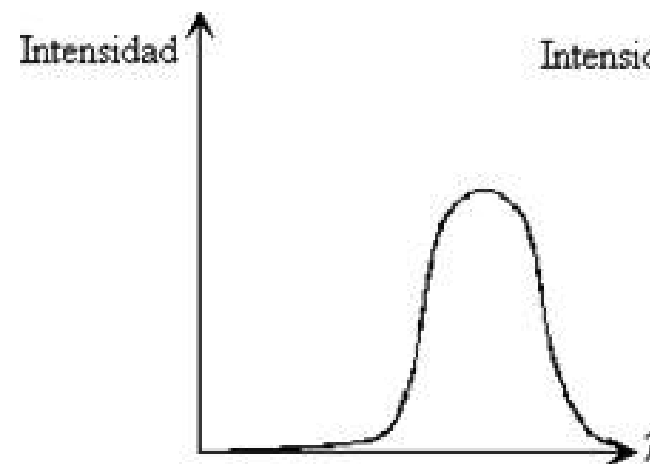
- En un LED cada partícula que forma el haz de luz (fotón) tiene su propia característica. Así el espectro emitido es ancho y multifrecuencia.
- Por el contrario, con el LASER se consigue un haz de luz en la que todas sus partículas (fotones) tienen igual fase y frecuencia, es decir, se consigue **luz coherente**.



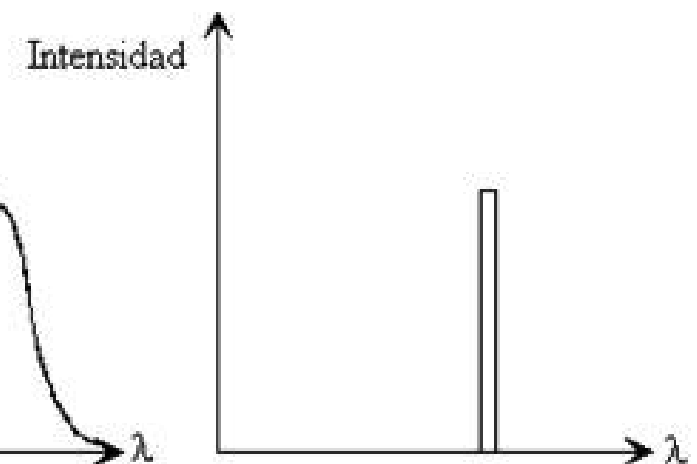
Emisión fotónica en diodo LED



Emisión fotónica en diodo LASER



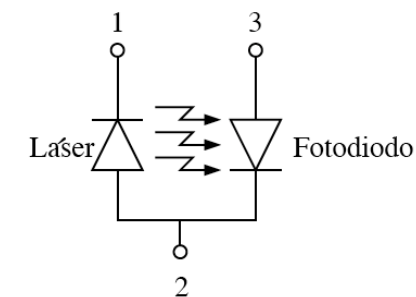
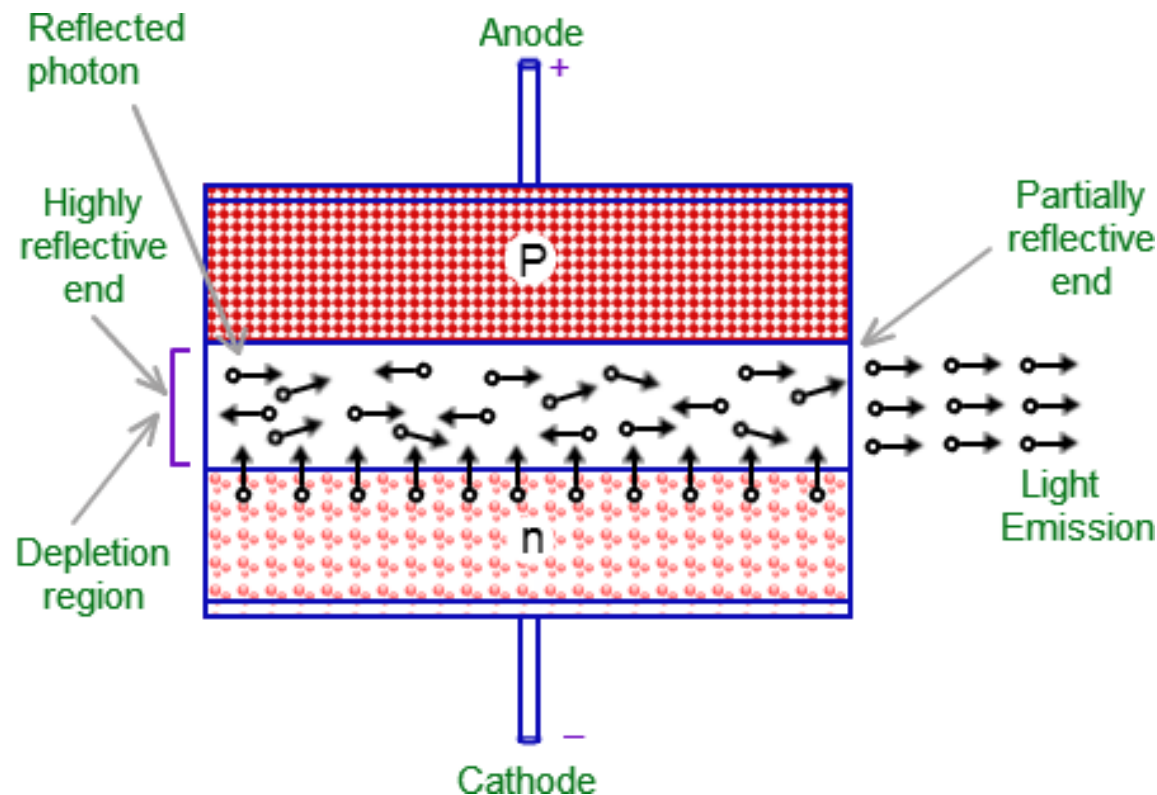
Espectro emitido por un LED



Espectro emitido por un LASER

LASER de diodo

- Uno de los tipos de láseres más comúnmente usados es el diodo laser.
- Cuando una corriente eléctrica pasa a través del diodo, los electrones y huecos se recombinan en la región activa del semiconductor, liberando energía en forma de fotones. Estos fotones se reflejan múltiples veces entre dos espejos, amplificando la luz y creando un haz coherente y monocromático.
- Se pueden realizar láseres de diodo de tamaño micrométrico.
- El diodo láser también se conoce como láser semiconductor.

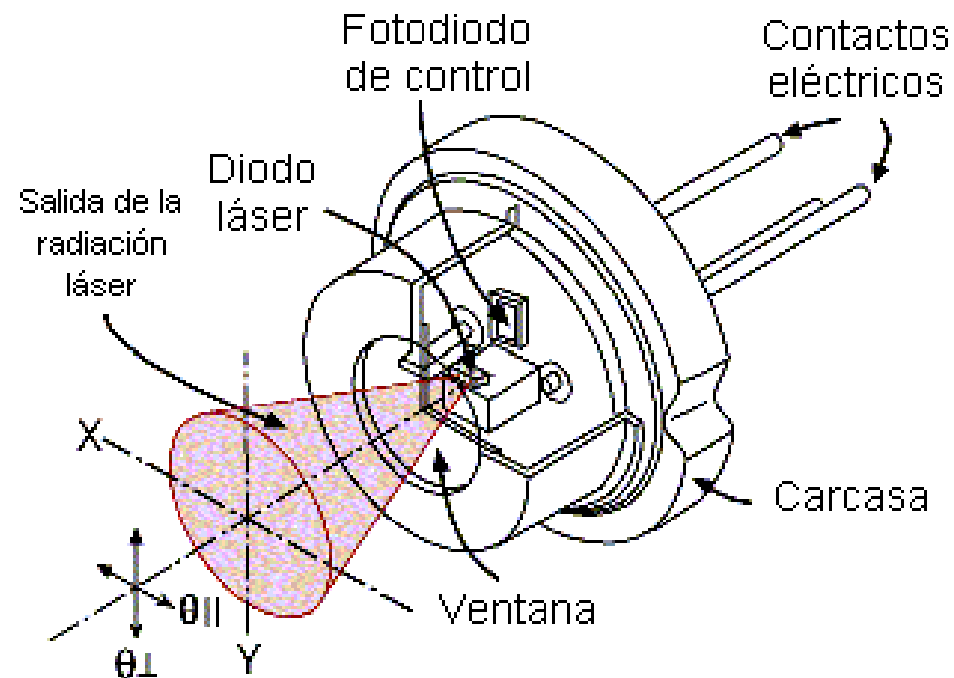


- 1.- Cátodo del diodo láser
- 2.- Ánodo del diodo láser
Cátodo del fotodiodo
- 3.- Ánodo del fotodiodo

LASER

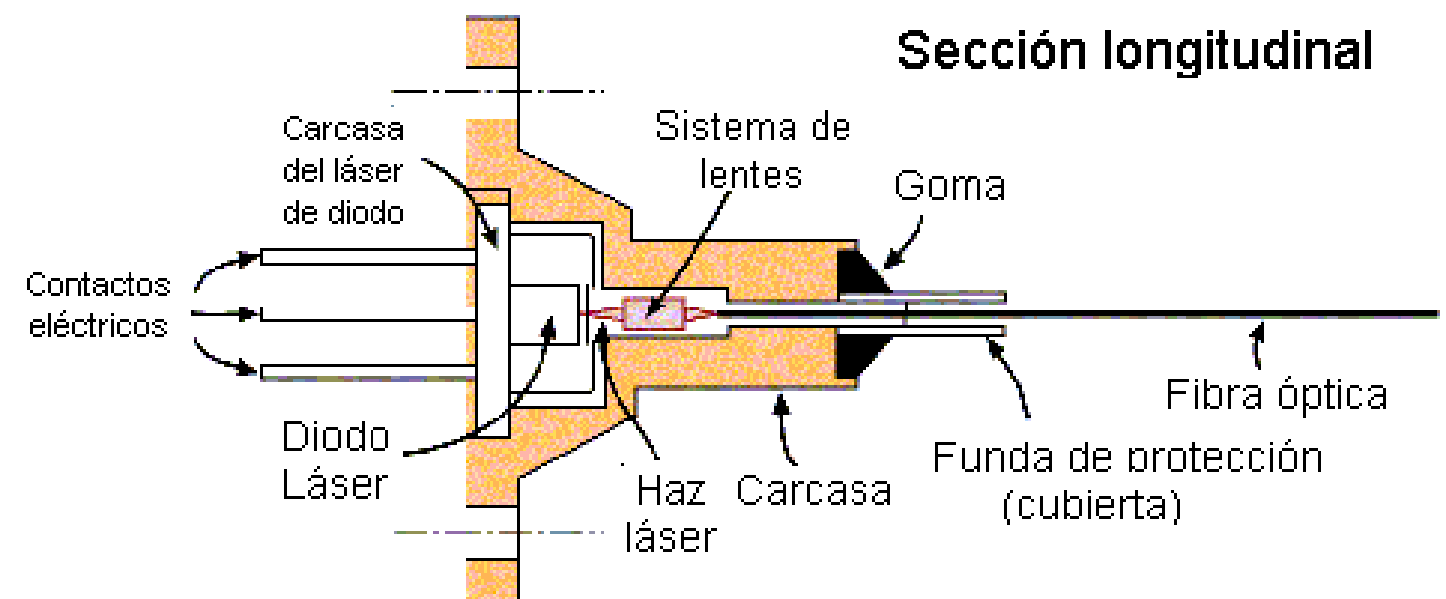
FREE OPTICS

Emisión en
espacio libre



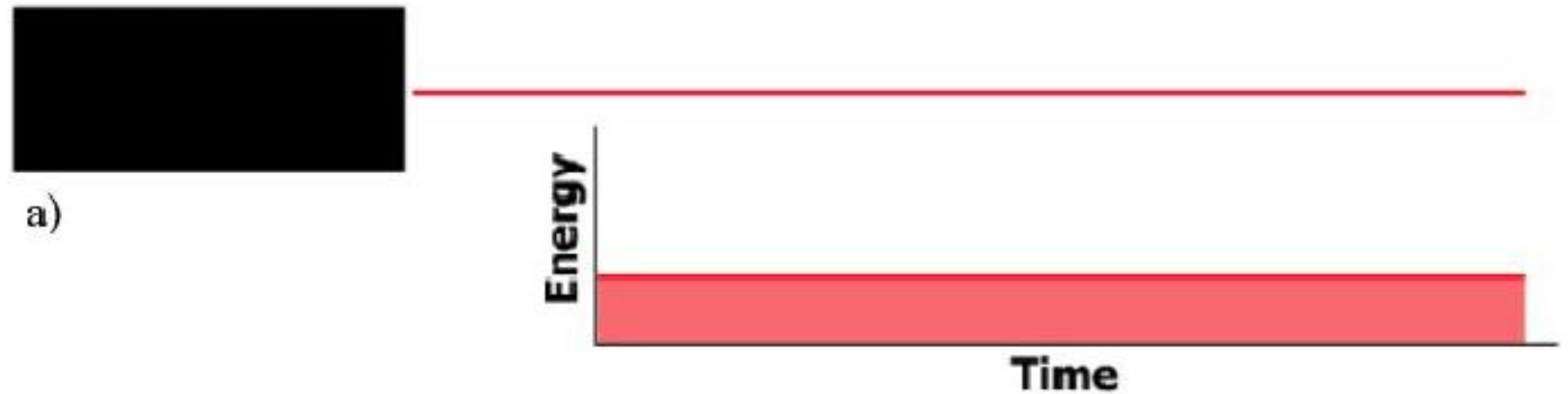
FIBER OPTICS

Emisión en
fibra óptica

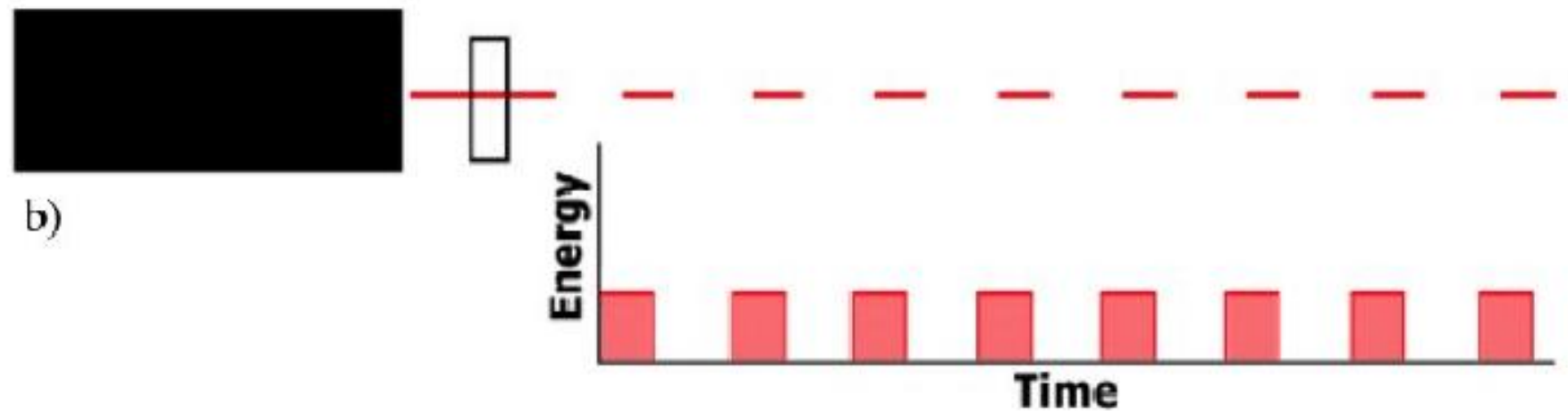


MODO DE OPERACIÓN

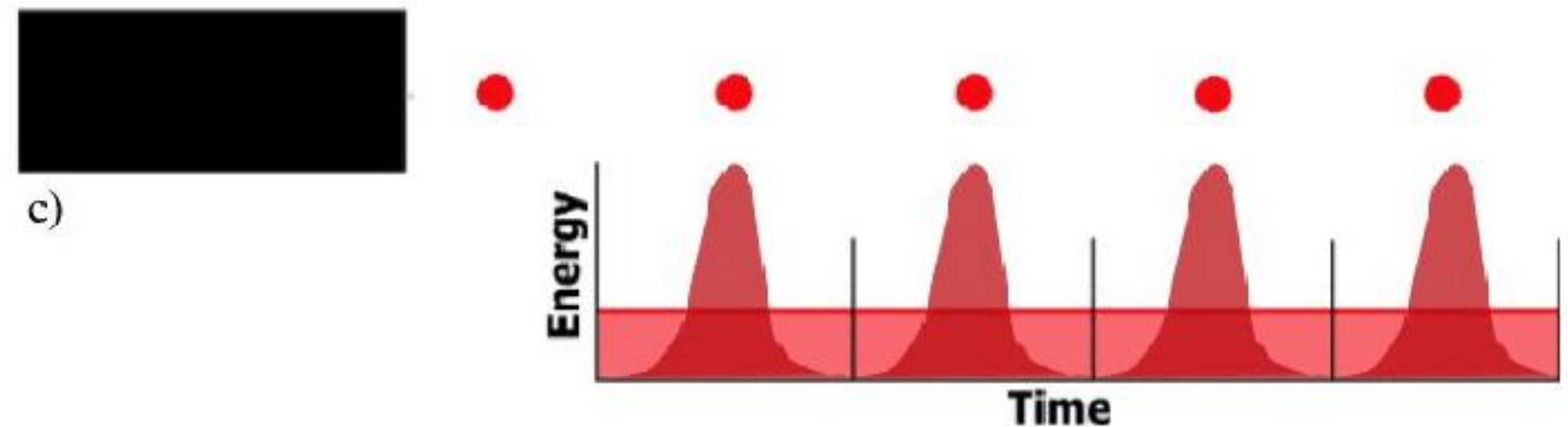
EMISIÓN CONTINUA
CW



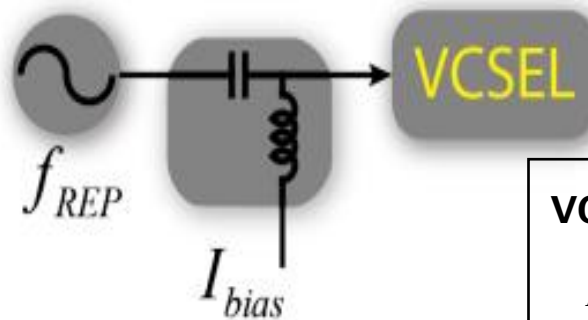
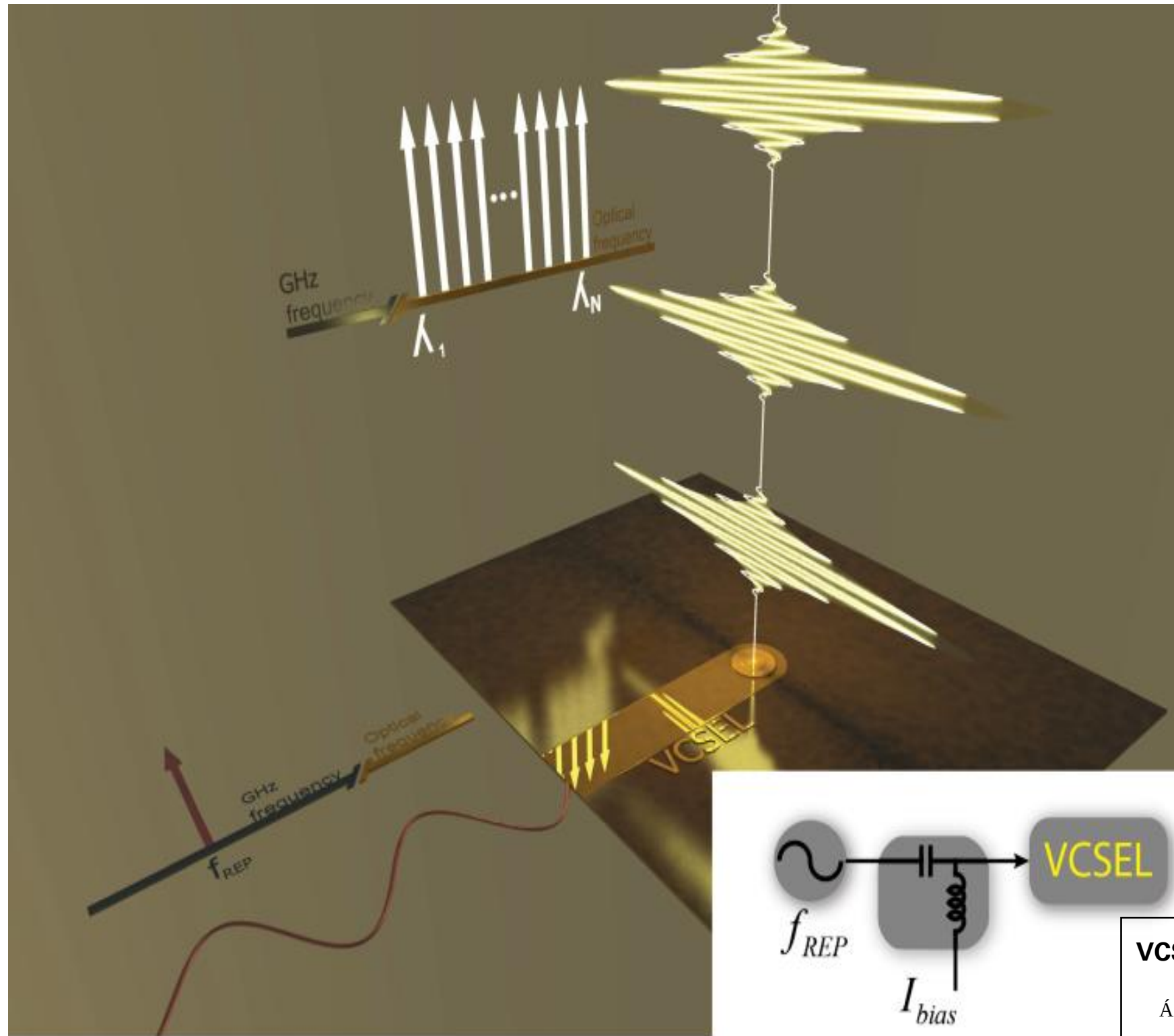
EMISIÓN DISCRETA
DV



EMISIÓN PULSADA
PL



Gain Switching (GS)



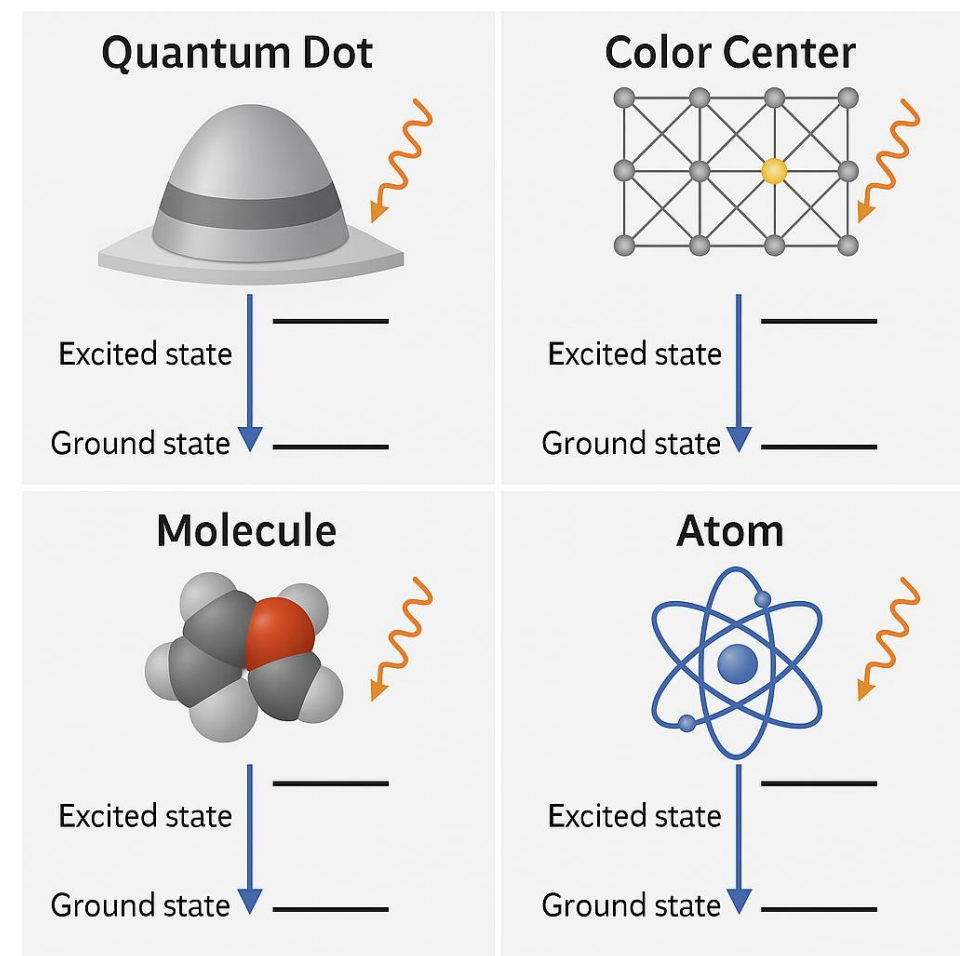
VCSEL-Based Optical Frequency Combs: Toward Efficient Single-Device Comb Generation

Á. R. Criado, C. de Dios, E. Prior, M. Ortsiefer, P. Meissner, and P. Acedo.

Oct 2013: *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 20, pp. 1981–1984.
doi:10.1109/LPT.2013.2280700

Single photon emitters (SPE)

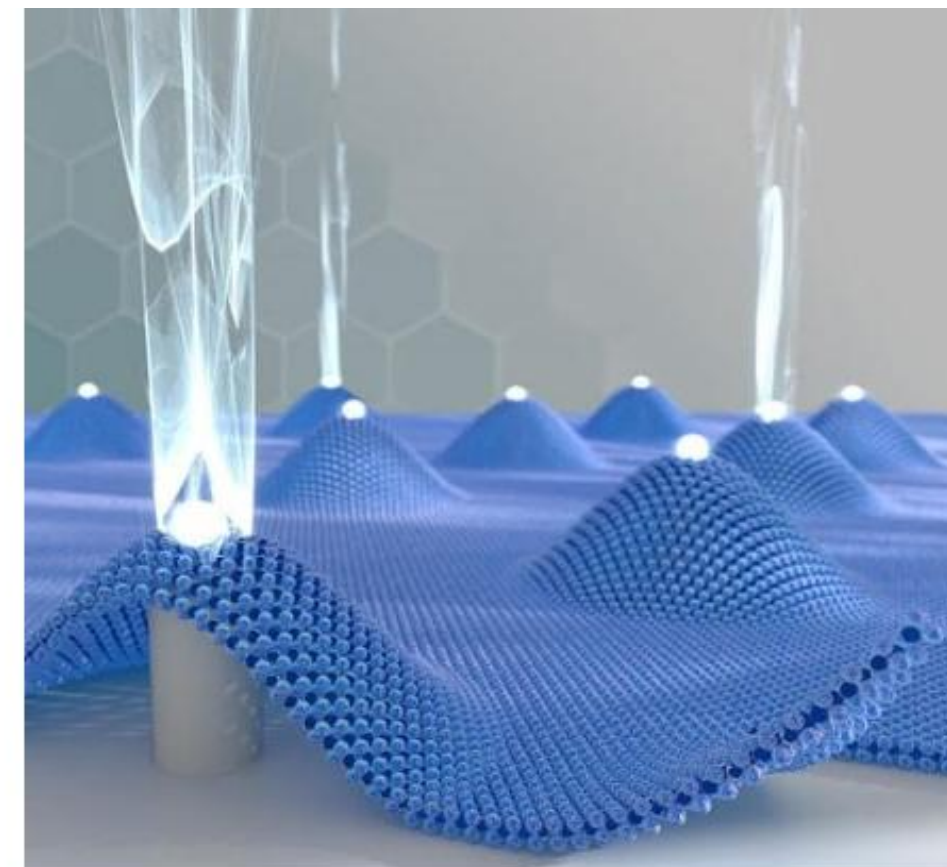
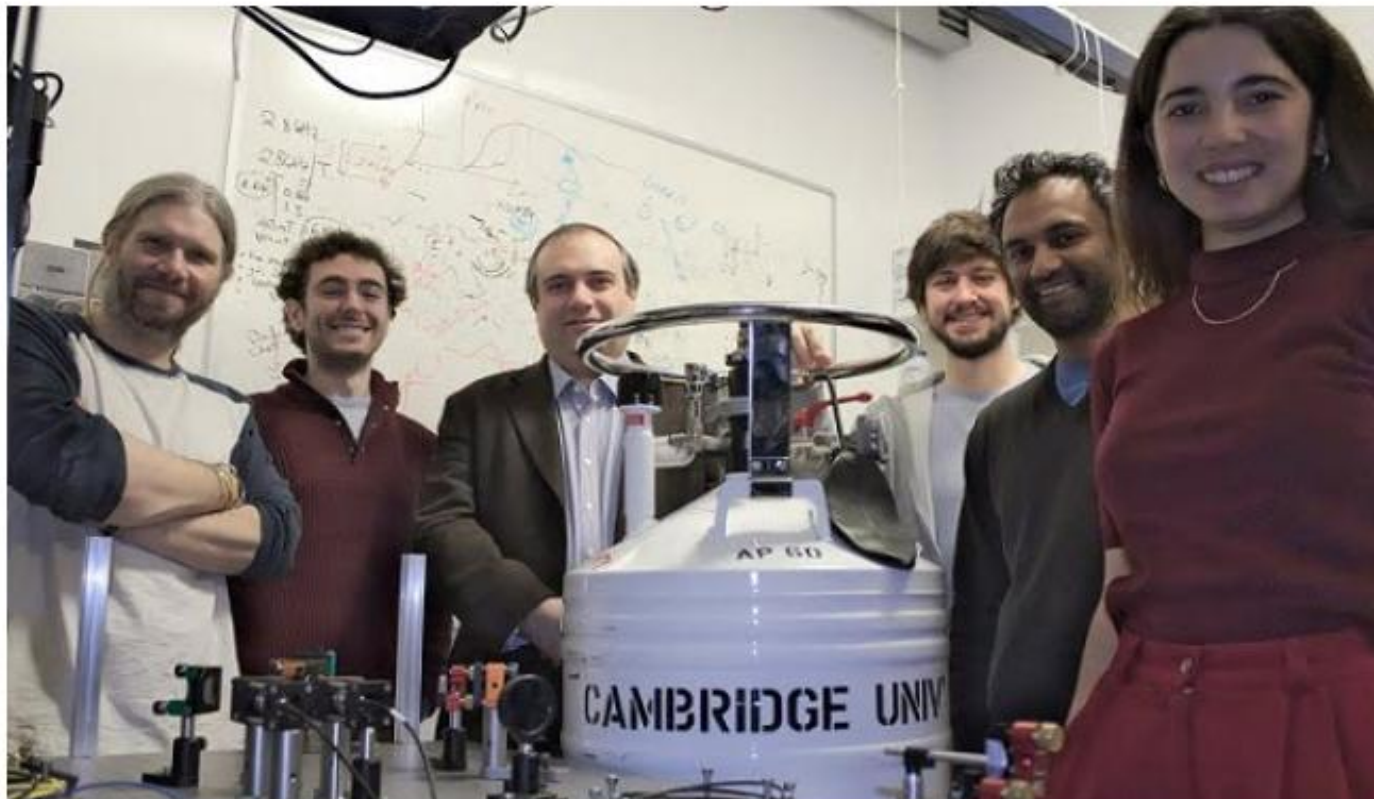
- Los protocolos DV-QKD necesitan emisores de fotones individuales, es decir dispositivos que emiten fotones uno por uno.
- Se basan en el principio de emisión cuántica controlada: un sistema físico (un átomo, una molécula, un punto cuántico...) **solo puede emitir un fotón cuando decae de un estado excitado a su estado fundamental**. Si el sistema está bien diseñado, no puede emitir más de uno a la vez.
- Se basan en distintas tecnologías:
- Se utilizan **láseres pulsados** para que en cada pulso vaya codificado un único qubit.
- **Puntos cuánticos (quantum dots):** Utilizan nanocristales semiconductores.
- **Diamante:** Efectos en la estructura cristalina del diamante, como los centros de nitrógeno-vacante (NV).
- **Átomos o iones atrapados**
- Otros...



Single photon emitters

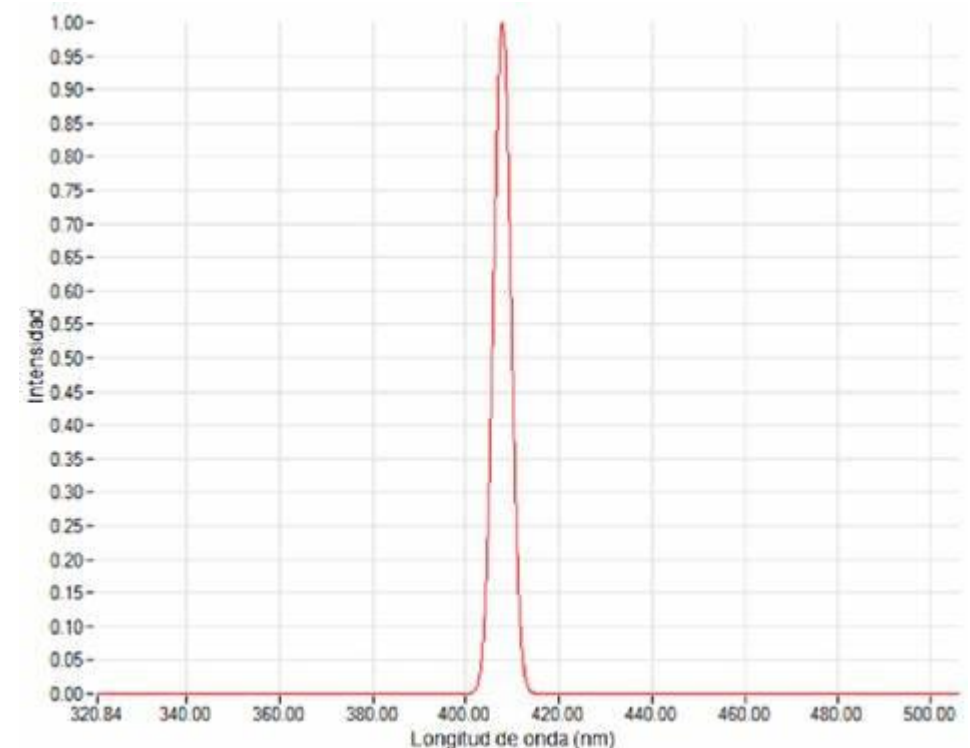
- El protocolo BB84 original requiere fuentes perfectas de un solo fotón, pero son extremadamente difíciles de conseguir.
- Ejemplo:
SPE basados en Quantum Dots en capas atómicamente delgadas de dicalcogenuros de metales de transición (TMD).

Palacios-Berraquero, C., Kara, D., Montblanch, AP. *et al.*
Large-scale quantum-emitter arrays in atomically thin semiconductors. *Nat Commun* **8**, 15093 (2017).
<https://doi.org/10.1038/ncomms15093>



Fuentes de estado coherente

- Dado que las SPE son notoriamente difíciles de construir, han sido reemplazadas por **fuentes de estados coherentes**
- Emiten luz altamente coherente, es decir, tienen una longitud de decoherencia elevada: los fotones tienen la misma frecuencia y fase
- Y consecutivamente esas fuentes se atenúan fuertemente para emitir un fotón por pulso
- El reto es que al ser fuentes imperfectas puede verse comprometida la seguridad
- No es fácil implementar BB84 con fuentes imperfectas



IDCuantique lasers

<https://www.idquantique.com/>



► ID 3000 Series Picosecond Lasers

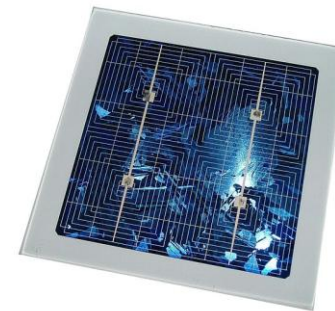
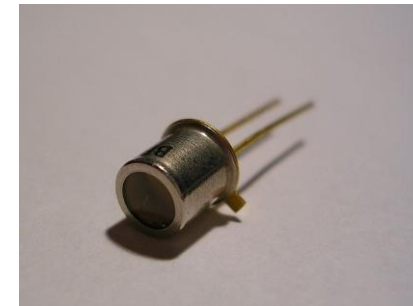


Detectores de luz

Sensores o detectores de luz

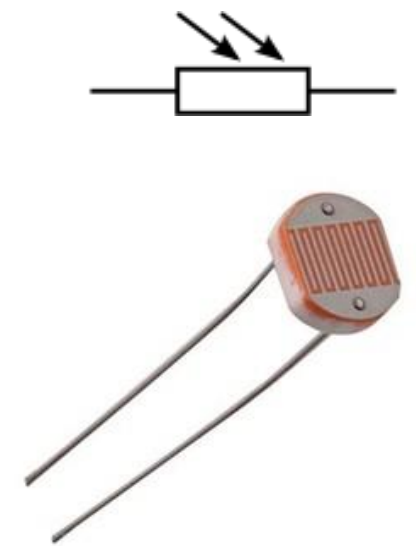
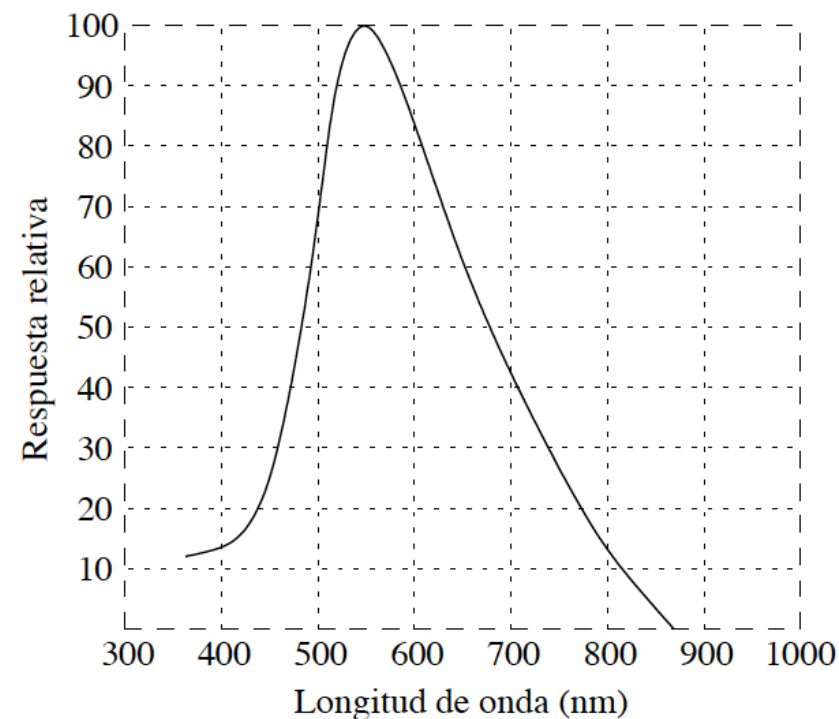
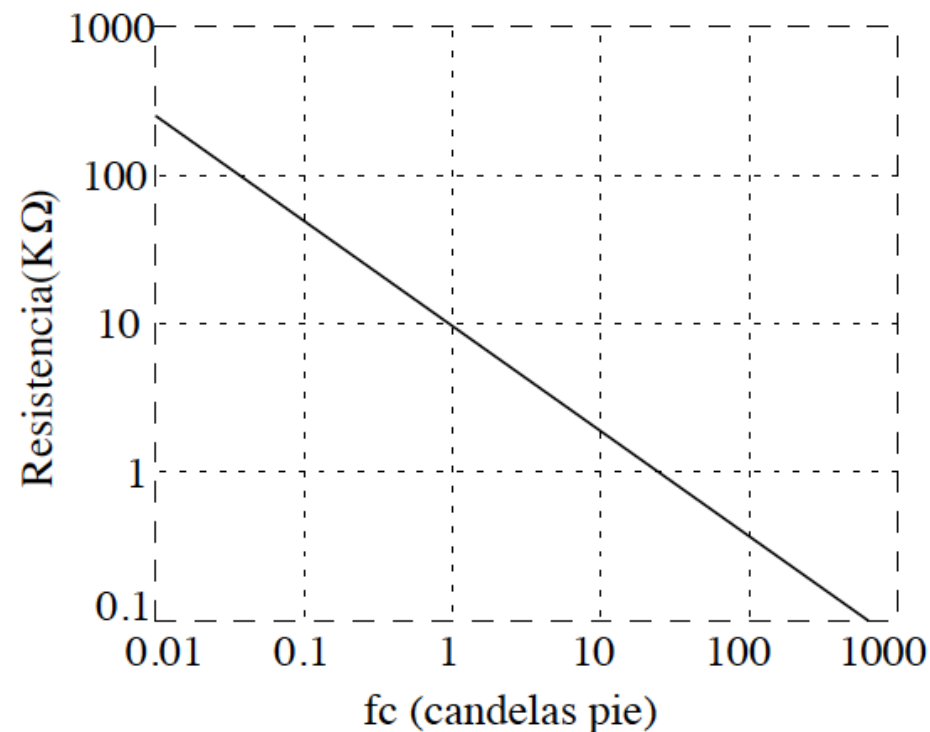
- Transforman señales ópticas en electrónicas.
- Son comúnmente llamados y usados como **fotodetectores**.
- Tipos:

1. Fotorresistencias
2. Fotodiodos
3. Fototransistores
4. Células solares
5. Count detectors



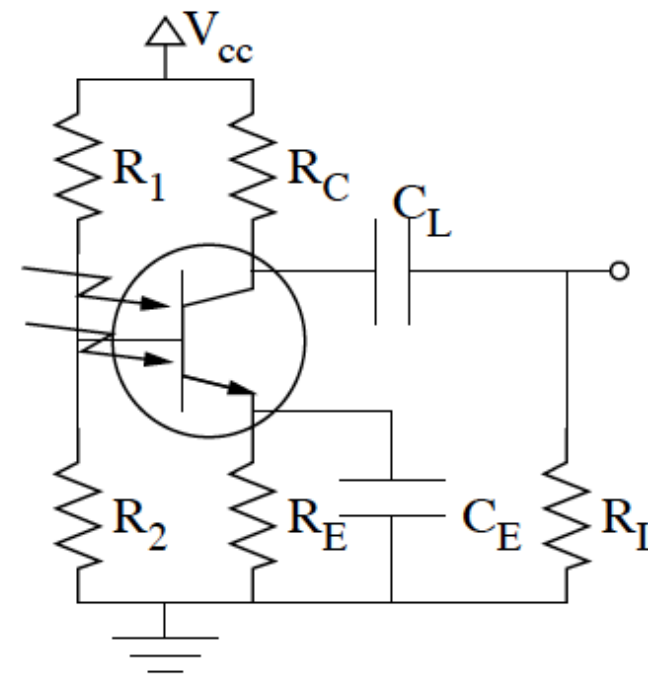
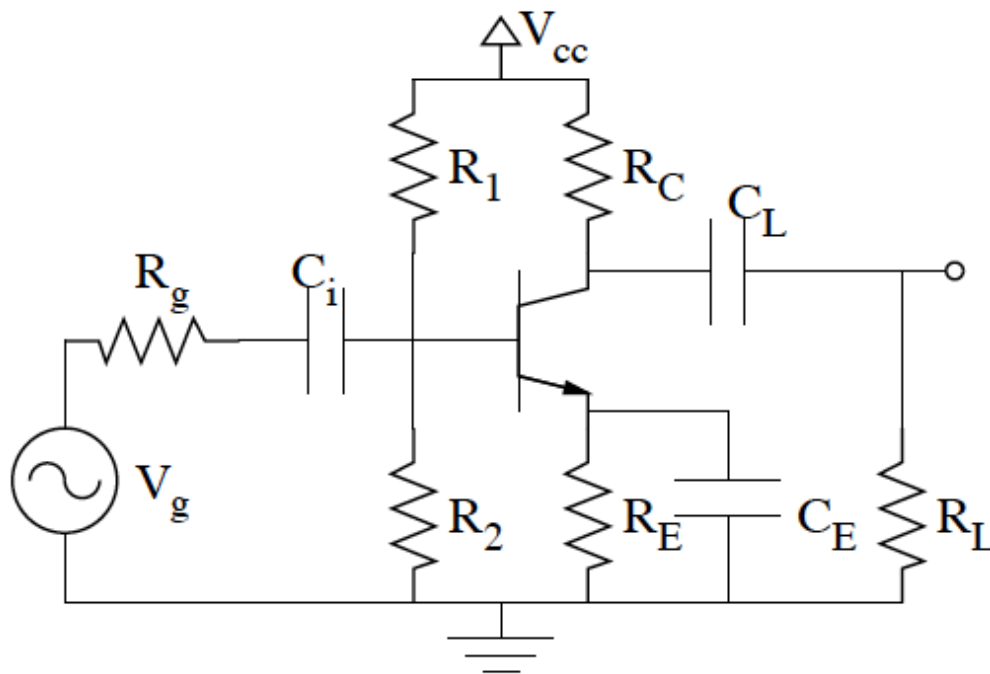
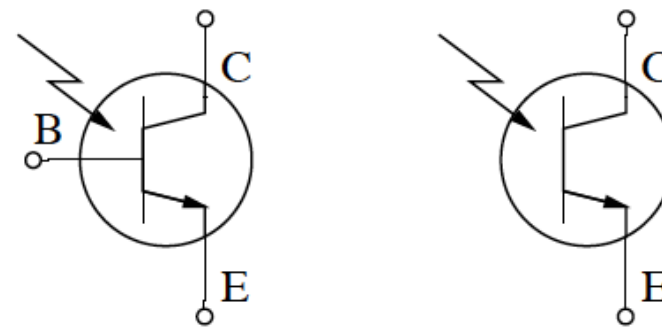
Fotoresistencia

- Tienen una resistividad que varía con la intensidad de luz que incide en ellos. (photoresistive effect).
- Fotorreceptor de tiempo lento (Sulfuro de Cadmio)
- También llamado LDR (*light-dependent resistor*)
- Tiempo de respuesta limitado
- Respuesta espectral:



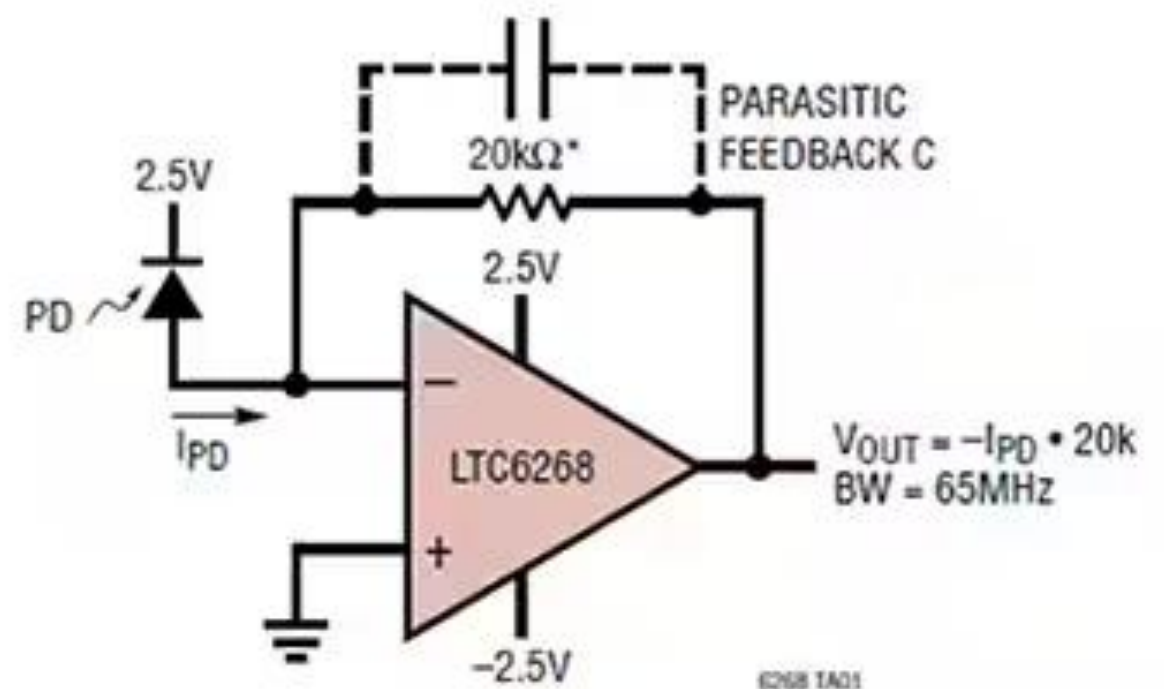
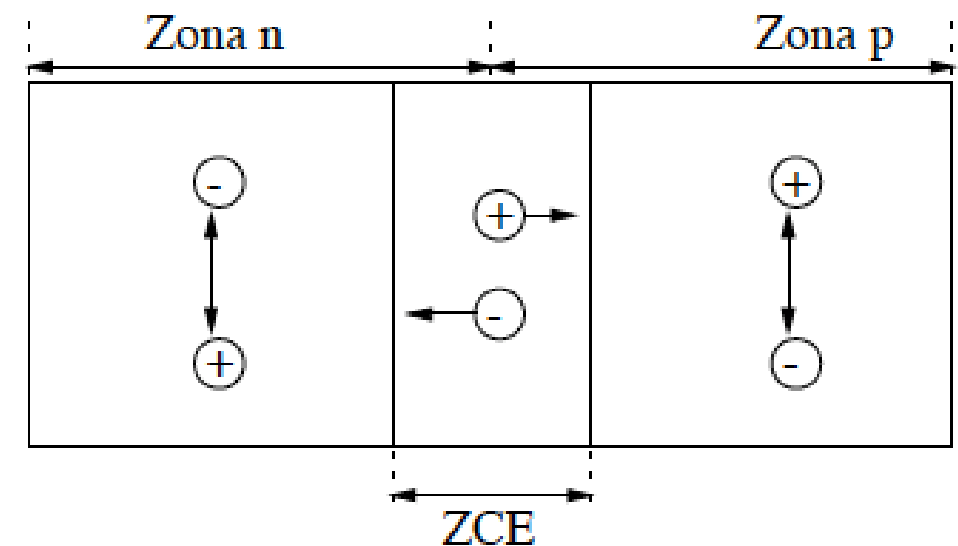
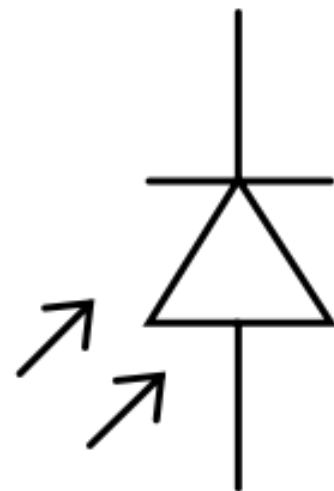
Fototransistor

- Es un transistor cuya corriente de base es proporcional a la luz incidente
- Tiempo respuesta bajo
- Entrega corriente alta



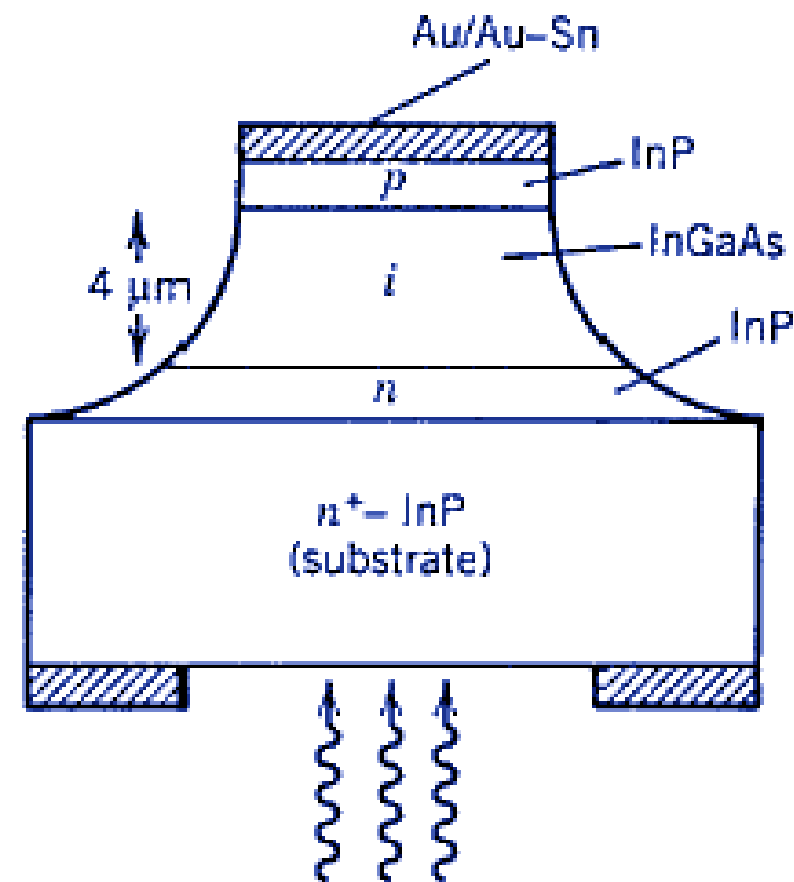
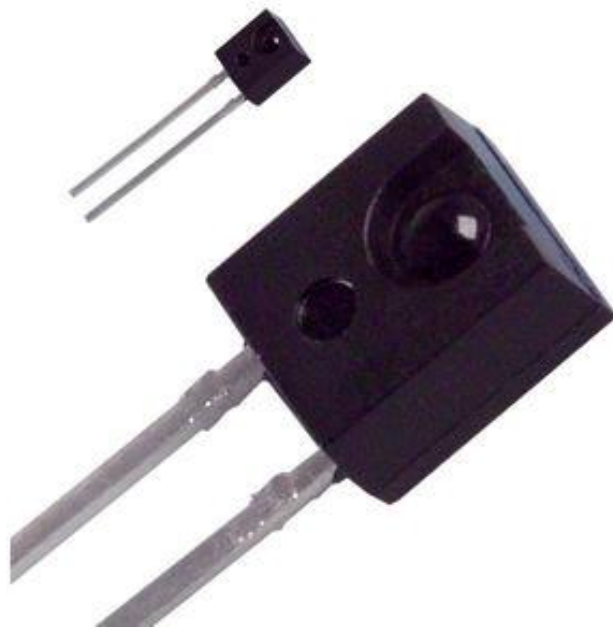
Fotodiodo

- Los fotodiodos convierten una cantidad de luz incidente en una corriente de salida.
- Es un diodo polarizado inversamente
- Dispositivos relativamente lentos
- Tipos:
- Fotodiodos PN
- Fotodiodos PIN
- **Fotodiodos APD**



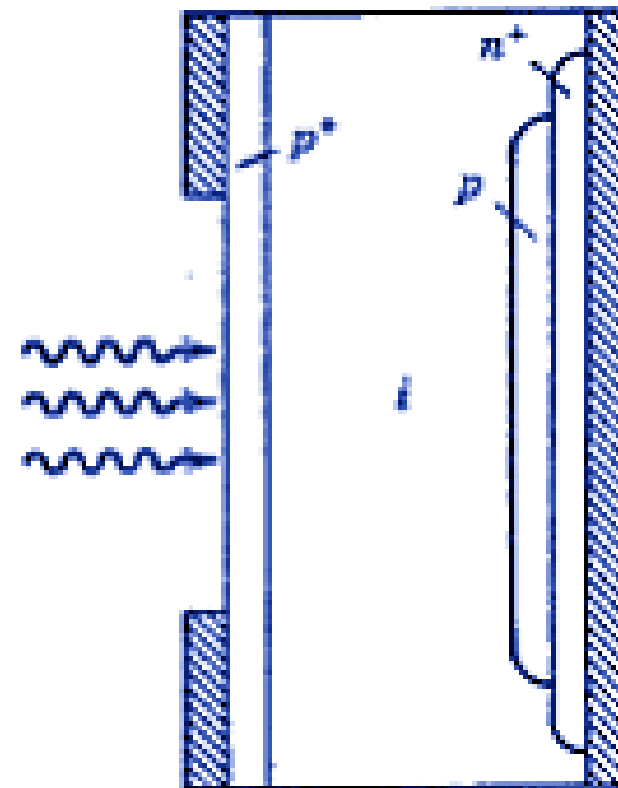
Fotodiodo PIN

- En un fotodiodo p-i-n se intercala un material intrínseco en la unión p-n para incrementar la región de deplexión.
- Son más eficientes que los PN.
- Son más lentos.



Fotodiodo APD

- Los fotodiodos de avalancha (Avalanche Photodiodes, APDs) tienen enorme responsividad.
- Tienen gran sensibilidad, luego se utilizan para detectar potencias muy pequeñas.
- Es importante el factor M de los APD, la ganancia multiplicativa de corriente, que hace que su respuesta sea mucho mayor ante incidencias pequeñas.



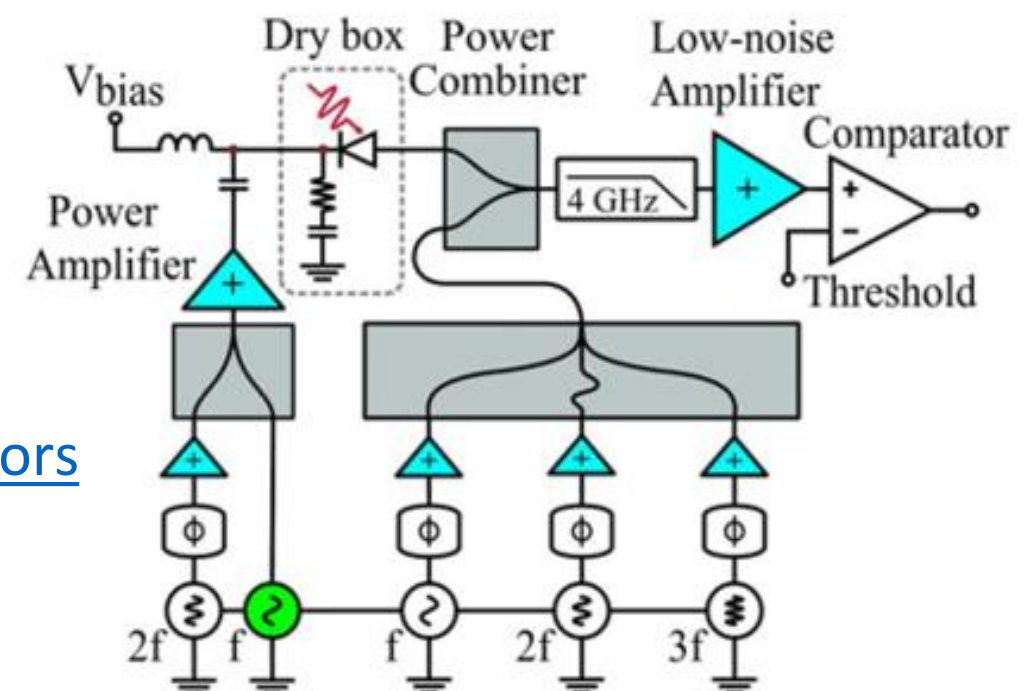
Detectores para DV-QKD: Count detectors

- Un count detector es un dispositivo que puede detectar la llegada de fotones individuales con alta eficiencia y baja tasa de ruido.
- Tipos de detectores incluyen:
 - **Detectores superconductores de nanocables (SNSPDs, Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors):** Detectores que utilizan nanocables superconductores para detectar fotones individuales con alta eficiencia
 - tienen una eficiencia cuántica superior al 90% con tiempos muertos muy cortos (~ 10 ns) lo cual permite altas tasas repetición (> 100 MHz).
 - **Detectores de avalancha de fotones únicos (SAPDs, single-photon avalanche photodiodes):** Detectores semiconductores (típicamente InGaAs) que pueden detectar fotones individuales mediante un proceso de avalancha.
 - tienen eficiencias cuánticas menores ($\sim 60\%$) pero son más económicos y fáciles implementar.
 - Fotomultiplicadores (**PMTs**)
 - Se ayudan de técnicas de interferometría (no son detectores*)

SPADs

- Los **fotodiodos de avalancha de fotón único** (SPAD), se basan en el efecto de avalancha de los semiconductores con polarización inversa.
- Son detectores a **temperatura ambiente**, de bajo costo y más o menos alto rendimiento.
- Actualmente, ofrecen una eficiencia de detección razonable (~50%), aunque los recuentos oscuros y los afterpulsing siguen siendo desafíos que deben abordarse.
- El NIST ha demostrado SPAD de InGaAs/InP y SPAD de Si de alta eficiencia (gruesos) son capaces de contar fotones de alta eficiencia y bajo ruido a velocidades superiores a 100 millones de recuentos por segundo.
- Existe una tecnología bastante establecida para la detección de fotones de luz visible, pero los detectores en longitudes de onda de telecomunicaciones requieren mejoras significativas.

<https://www.nist.gov/pml/quantum-networks-nist/technologies-quantum-networks/single-photon-detectors>



SNSPDs

- El detector de fotón único de nanocables superconductores (SNSPD) está hecho de una película delgada de material superconductor que cubre un área de detección activa como un nanocable serpenteante.
- El área activa suele estar diseñada para recoger la salida de una fibra óptica.
- El detector suele funcionar a una **temperatura inferior a 2,5 K**.
- Un solo fotón absorbido por el nanocable puede romper localmente la superconductividad, dando lugar a un breve pulso de voltaje que puede ser detectado.
- Los SNSPD cuentan con la fluctuación de tiempo más baja (<3 ps), alta eficiencia de detección (98% o superior), tasas de conteo de oscuridad muy bajas ($<10^{-3}$ /segundo), y tiempos muertos competitivos.

<https://www.nist.gov/pml/quantum-networks-nist/technologies-quantum-networks/single-photon-detectors>

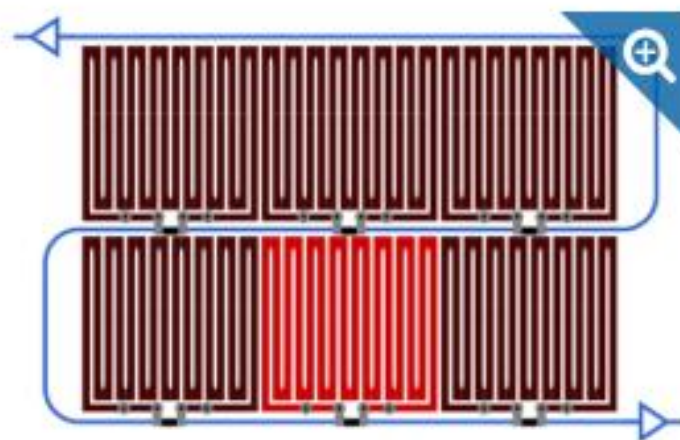


Figure 9 (a). 100 Megapixel SNSPD camera (schematic drawing)

Credit: Adam McCaughan/NIST



Figure 9 (b). A TES detector

Credit: Adriana Lita/NIST

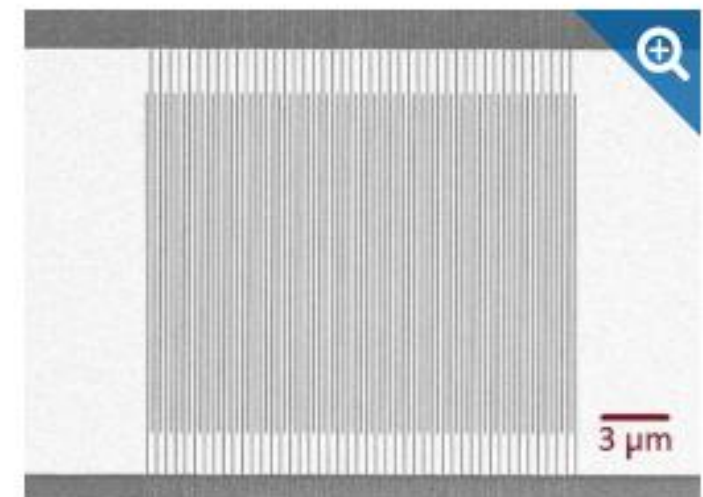


Figure 9 (c). A SNSPD detector

Credit: Varun Verma/NIST

SNSPDs

superconducting nanowire single
photon detector (SNSPD)

[https://snspd.com/
snspd-solutions](https://snspd.com/snspd-solutions)



Retos:

- Tamaño
- Temperatura de funcionamiento
- Eficiencia

IDCuantique detectors

<https://www.idquantique.com/>



SPAD

SNSPD



ID Qube STD

ID Qube LN

ID Qube ULN

ID230

ID281 Pro

ID281

Dimensions

9.5 cm

9.5 cm

9.5 cm

60 cm

19", 8U

63 cm

Efficiency

10% to 25%

10% to 25%

10% to 25%

10% to 25%

80% to 90%+

80% to 90%+

Dark count

< 800 cps

< 400 cps

< 200 cps

< 100 cps

< 100 cps to < 1 cps

< 100 cps to < 1 cps

Benefits

Compact
Portable

Compact
Portable
Low noise

Compact
Portable
Best size/noise ratio

Lowest noise level
with SPAD
benefits

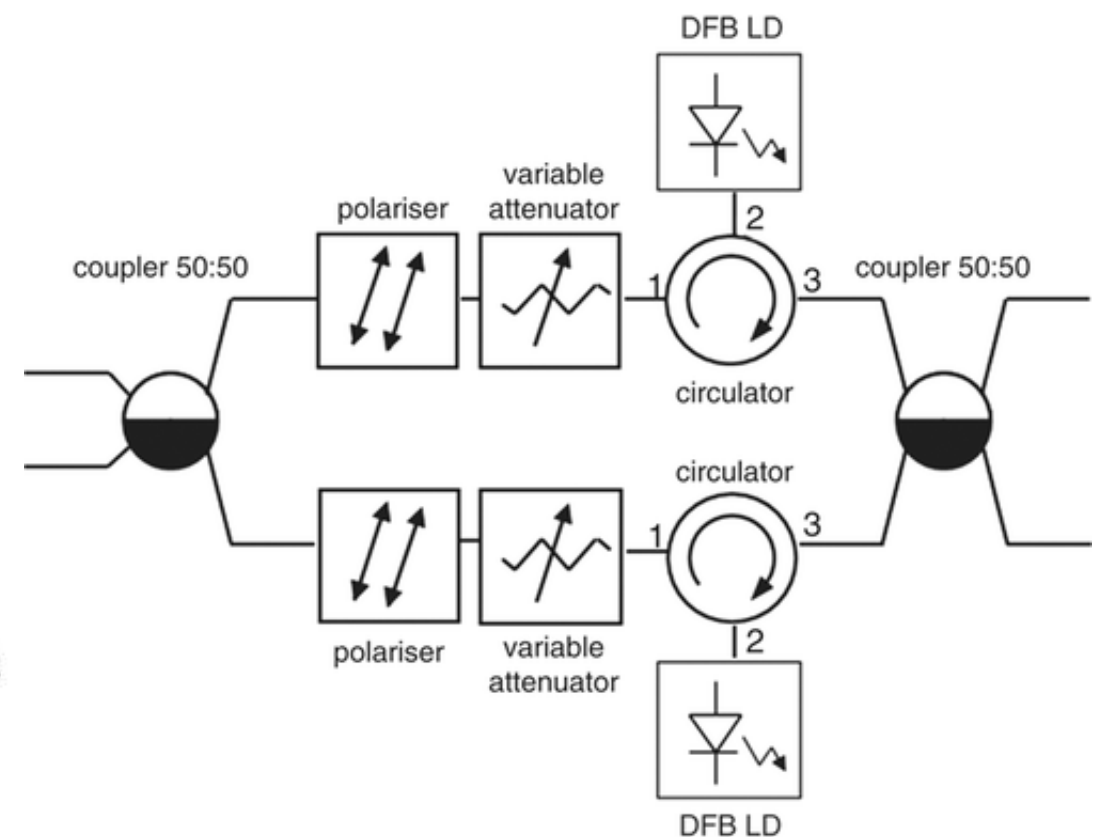
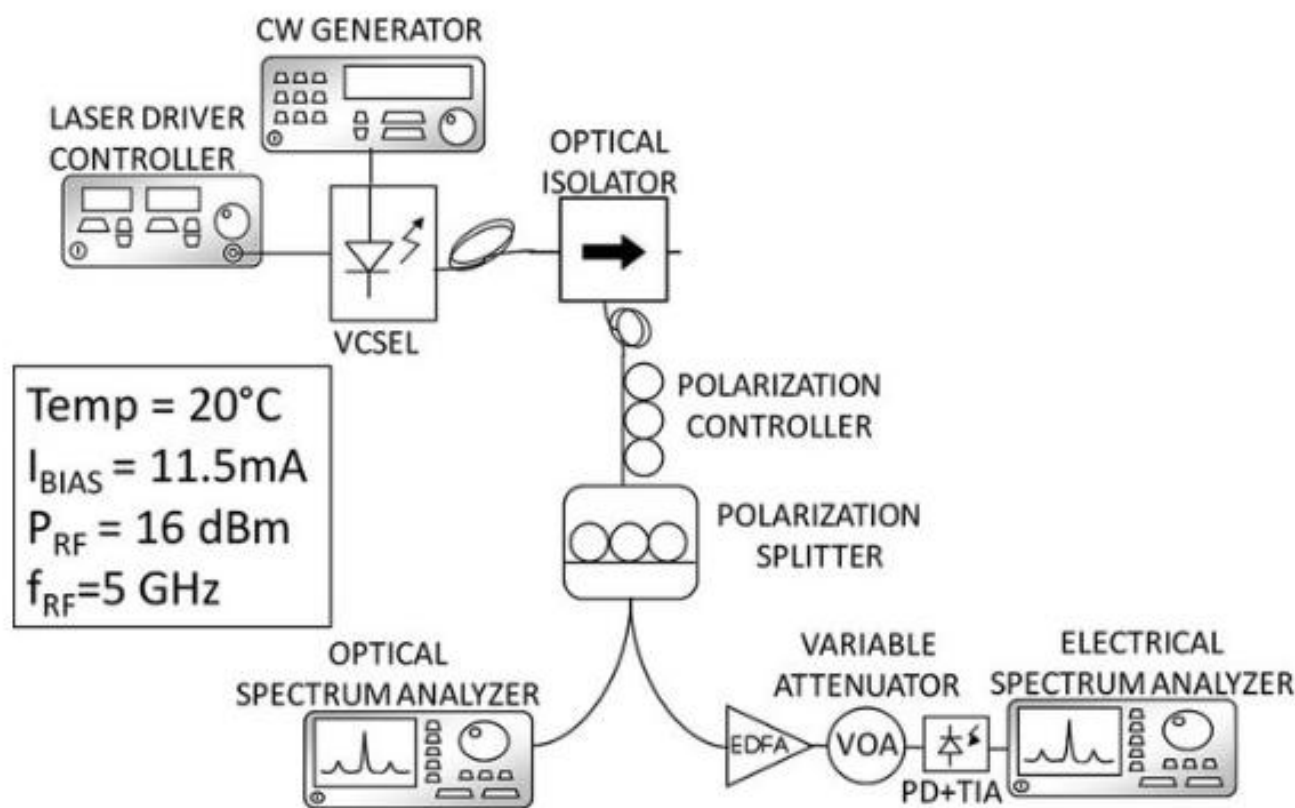
For the Quantum
Industry

For frontier
Quantum
Science

Otros dispositivos optoelectrónicos

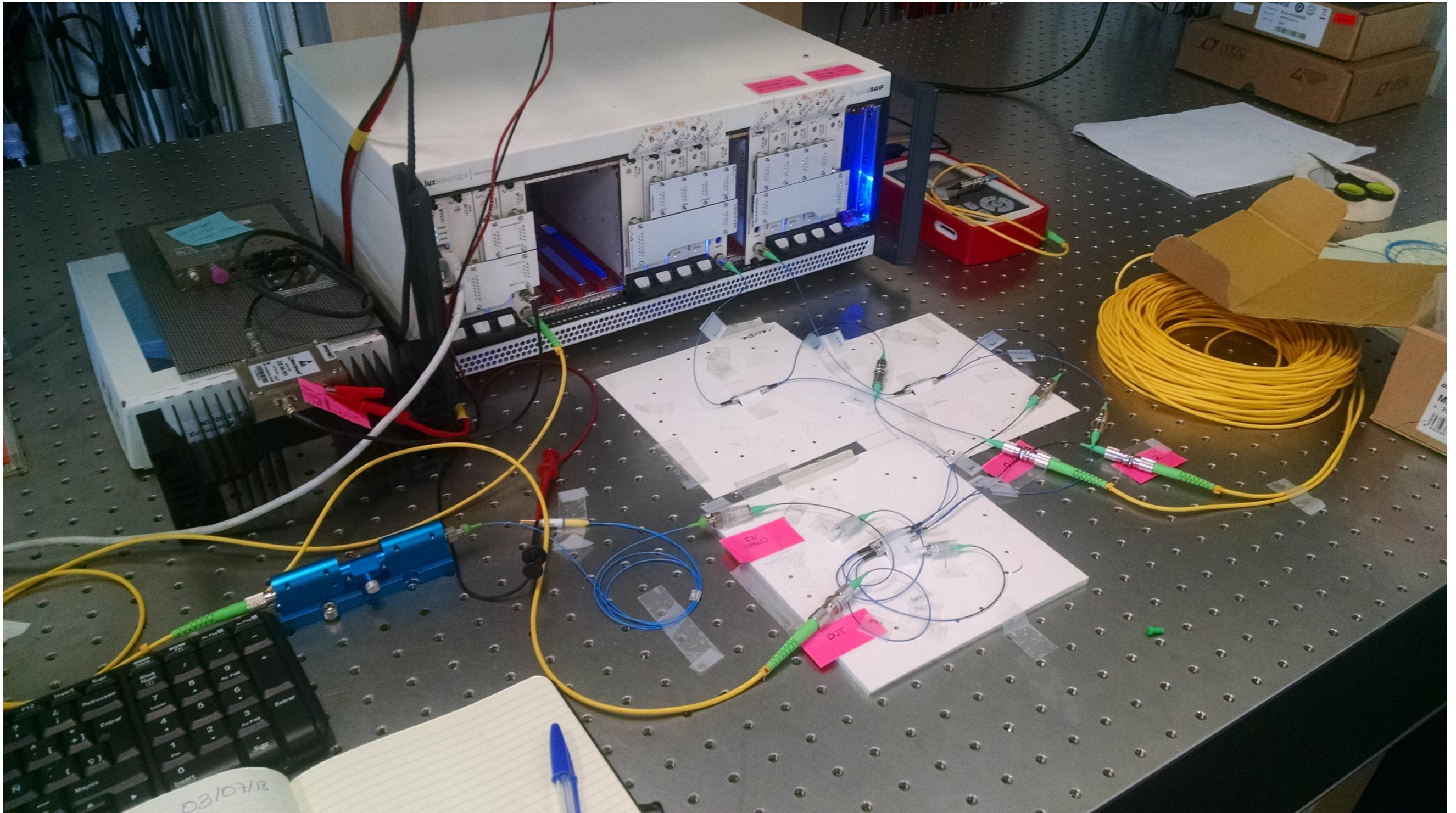
Otros componentes no emisores ni sensores

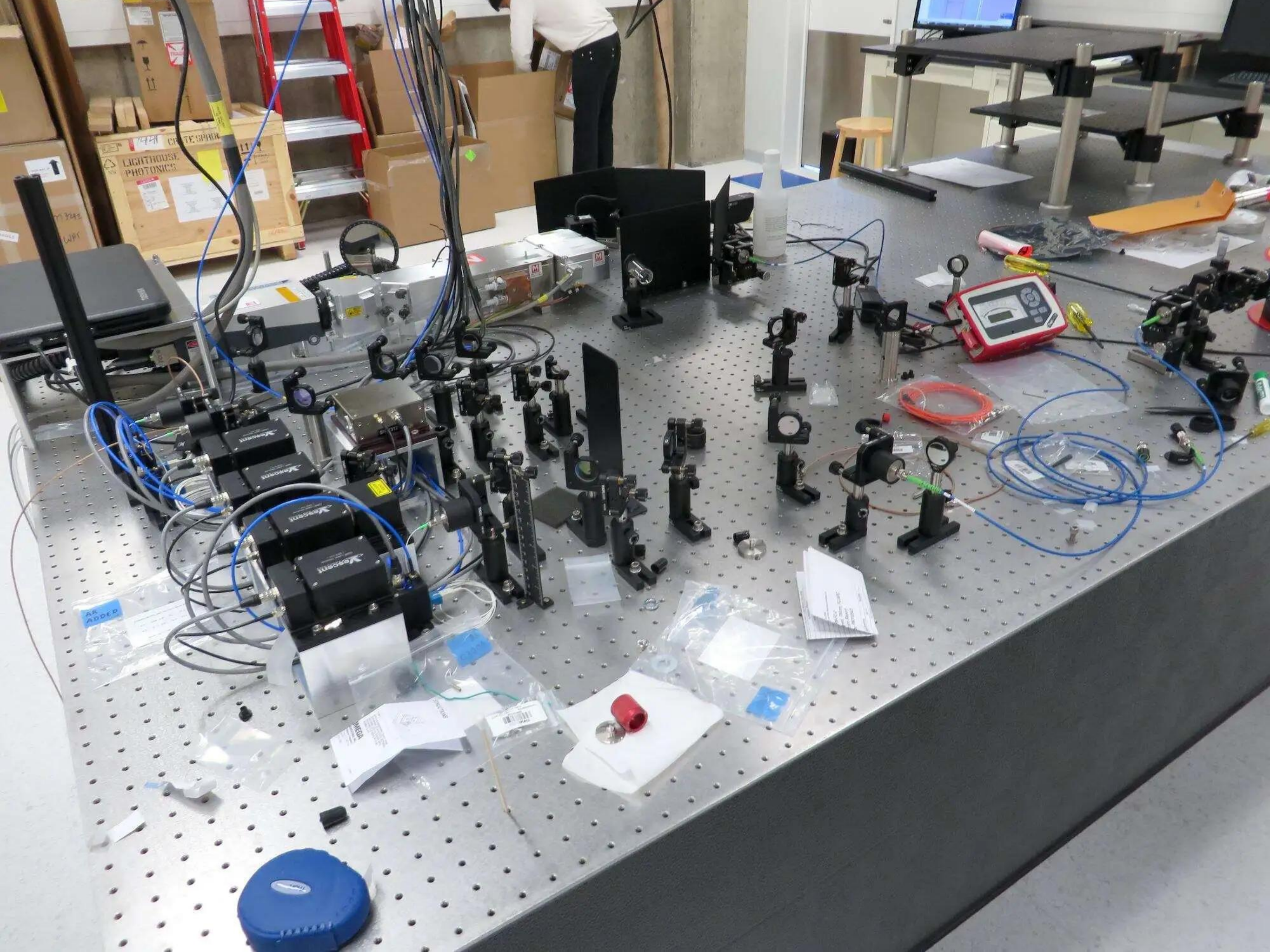
- Sirven para modificar y controlar la señal óptica:
- Aisladores, controladores de polarización, amplificadores ópticos, splitters (separadores) en frecuencia o en polarización, acopladores de señal, atenuadores, circuladores, moduladores, filtros, etc.
- Ejemplo real de setup optoelectrónico:



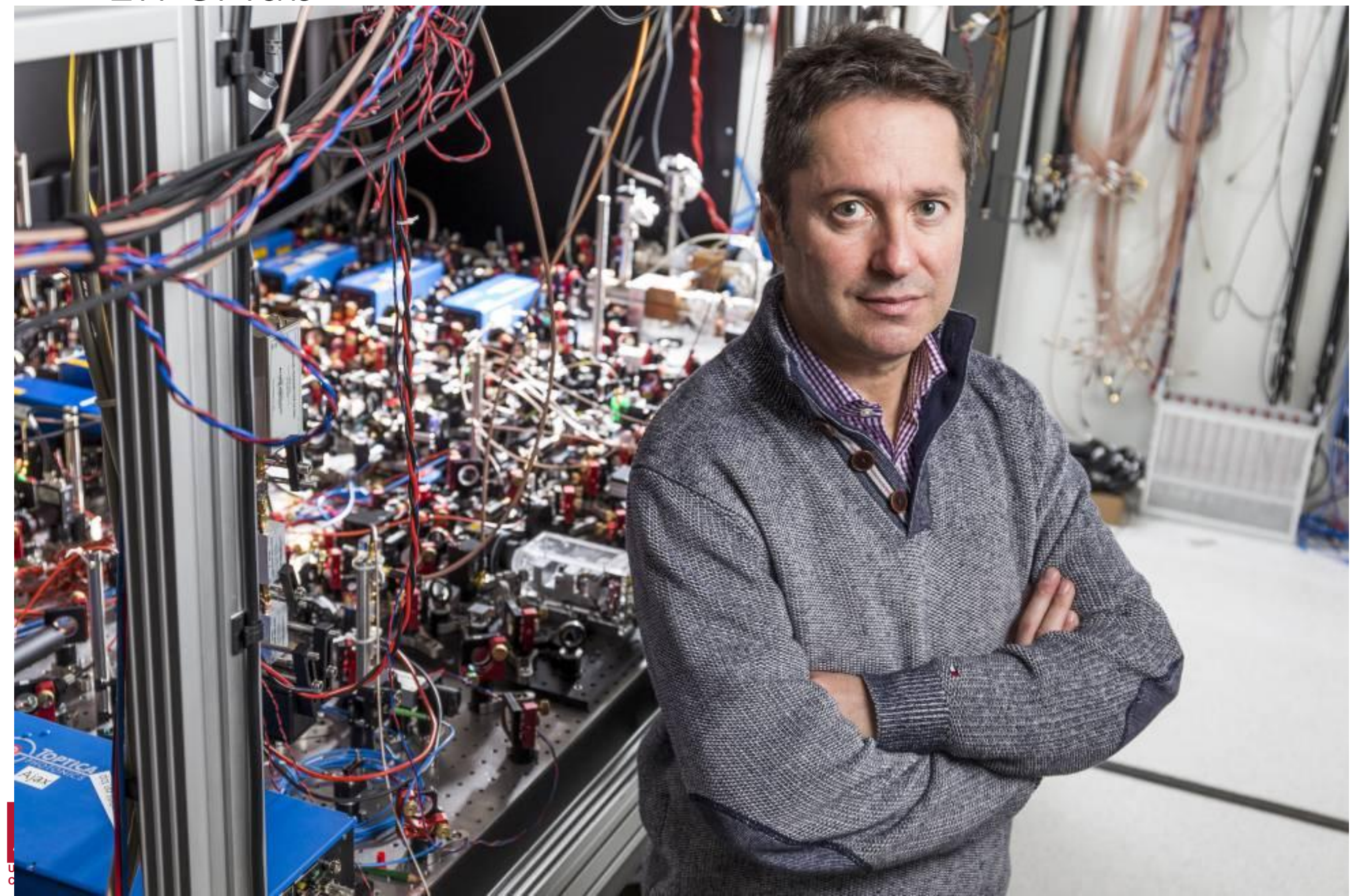
<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/el.2013.1896>

En el lab





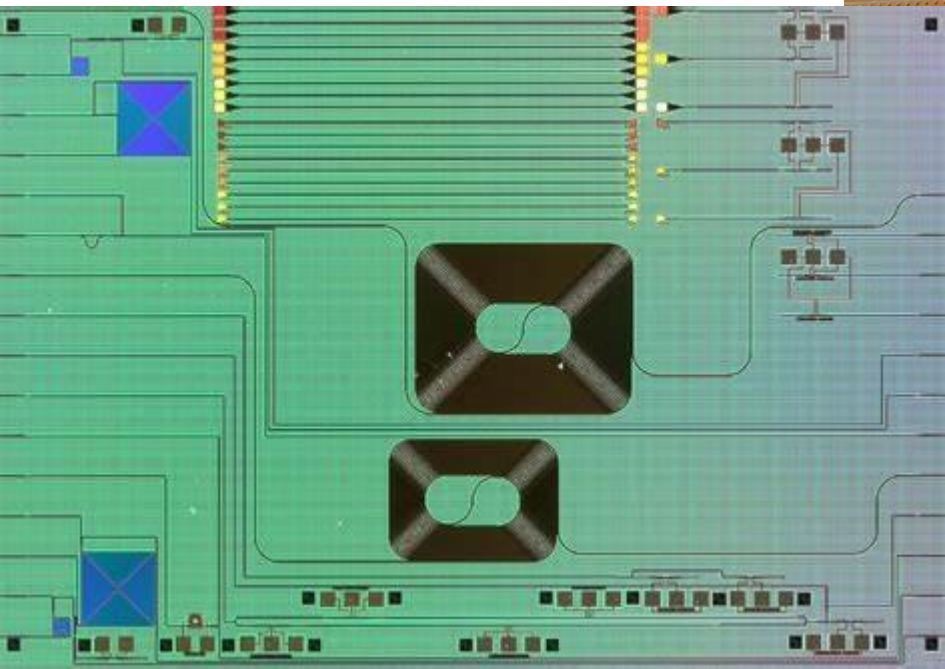
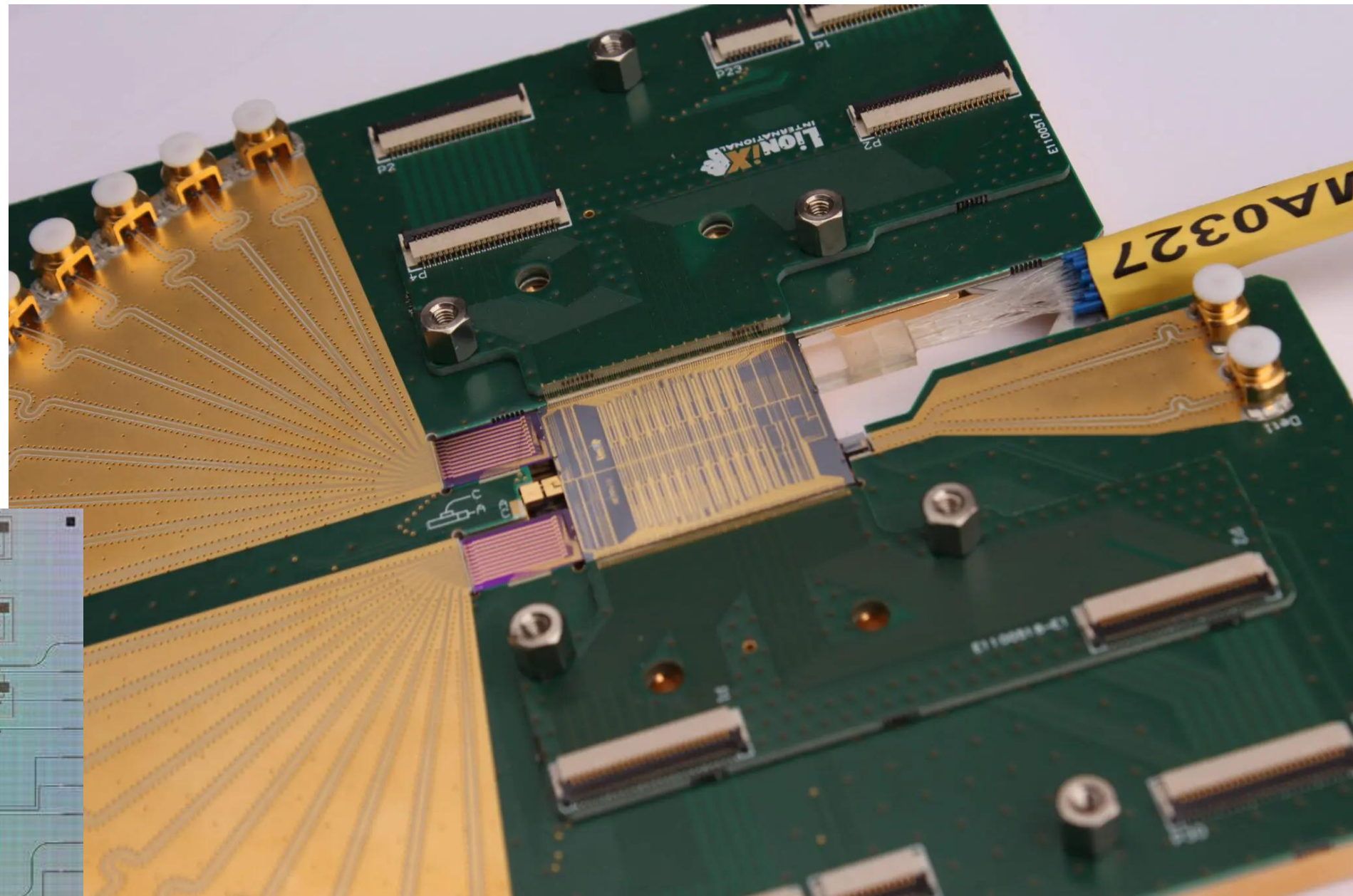
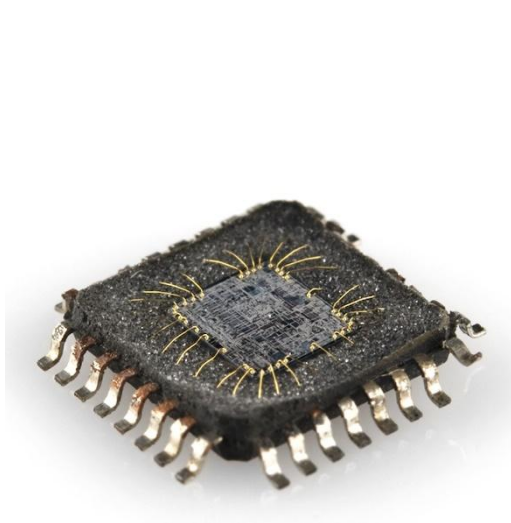
En el lab



Fotónica integrada (PICs)

Photonic Integrated Circuit, PIC

- Un circuito integrado fotónico (PIC, por sus siglas en inglés) es un microchip que integra múltiples funciones fotónicas (Detecta, genera, transporta y procesa la luz).
- Es un IC fotónico

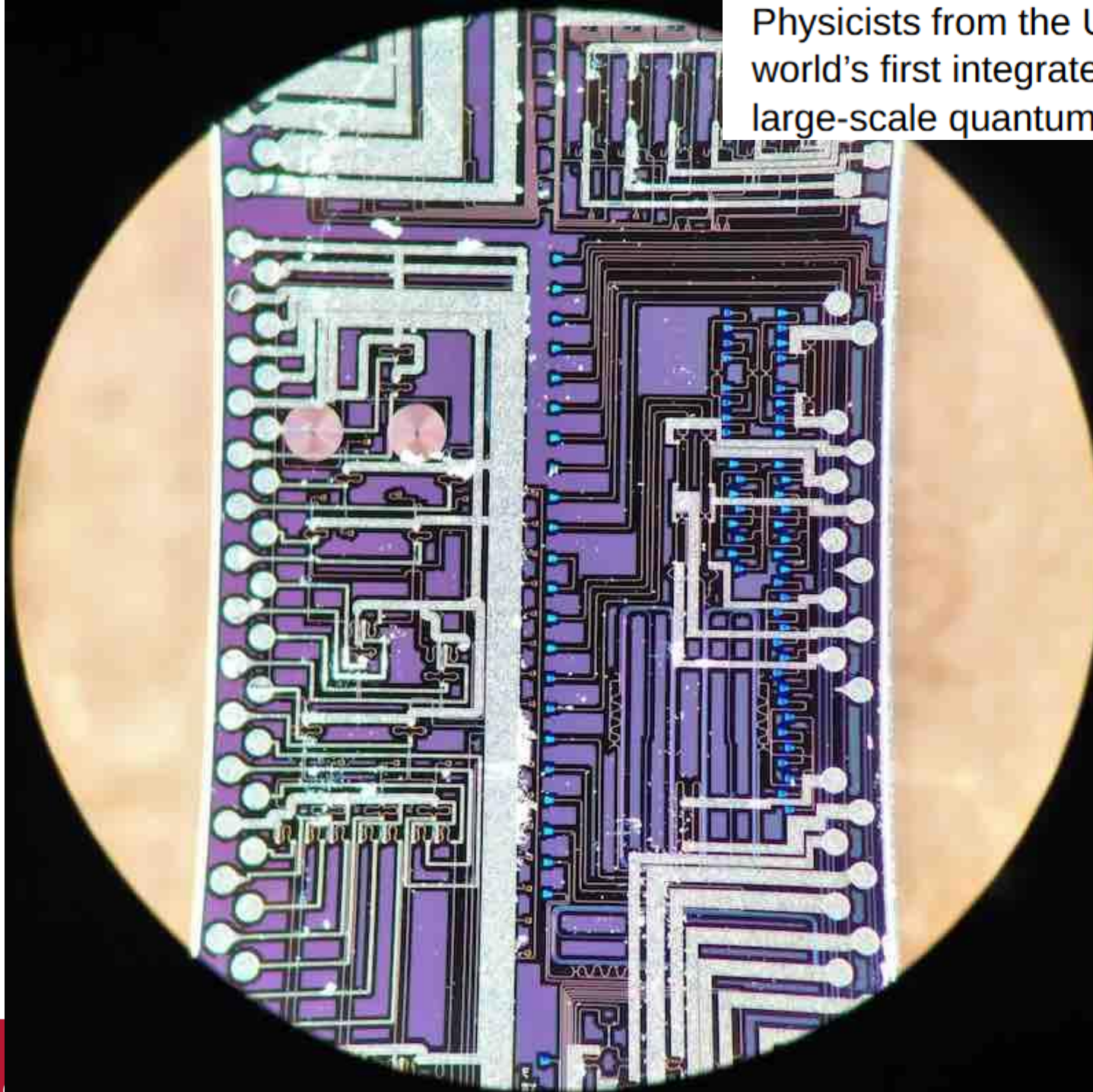


The First Integrated Photon Source to Deliver Large-Scale Quantum Photonics

May 29, 2020 by **Luke James**



Physicists from the University of Bristol in the UK have developed the world's first integrated photon source with the potential to deliver large-scale quantum photonics.

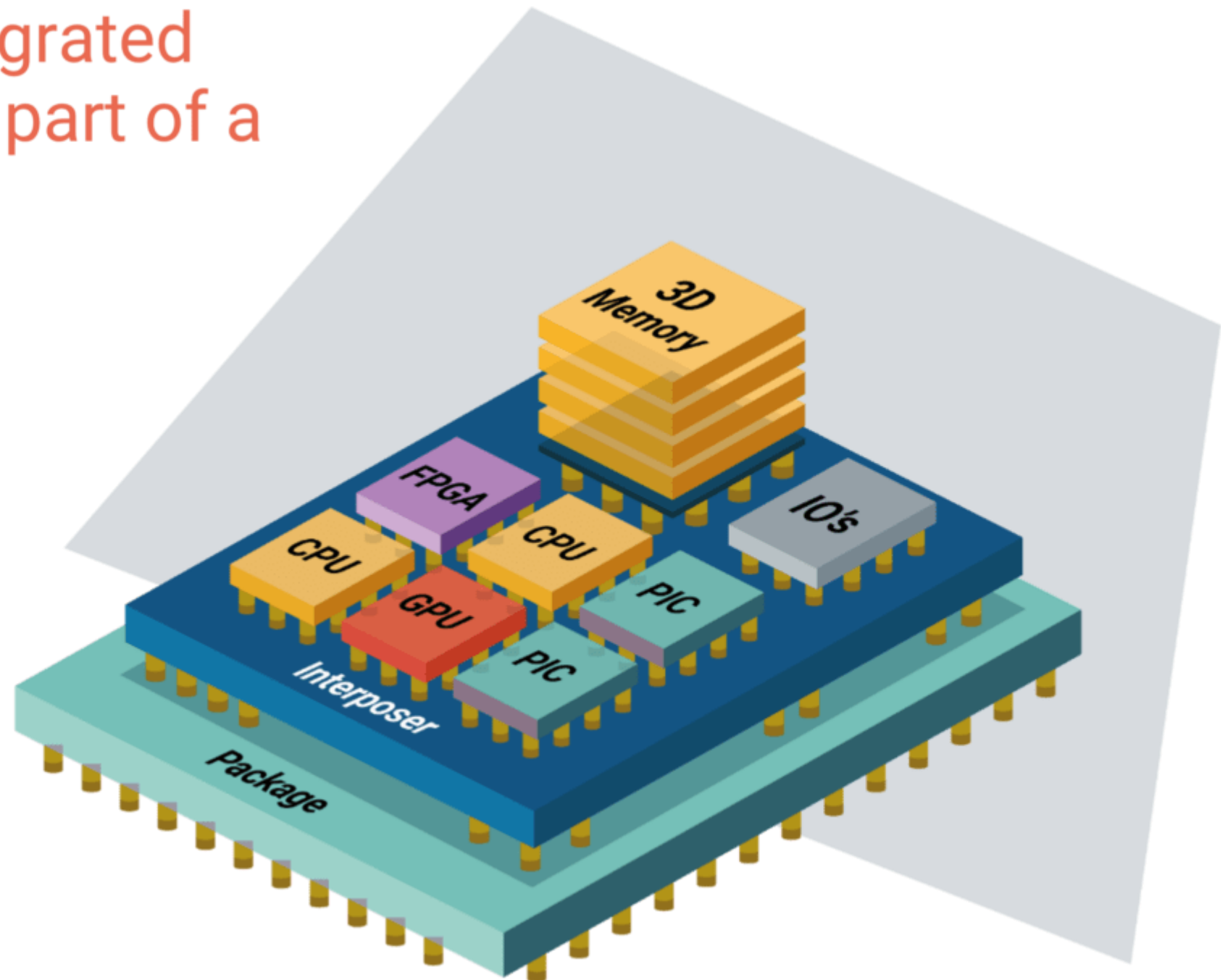


<https://www.allaboutcircuits.com/news/the-first-integrated-photon-source-to-deliver-large-scale-quantum-photonics/>

estefania.priorcano@uclm.es

Fotónica integrada (PICs)

A Photonic Integrated Circuit (PIC) as part of a system



QKD: sistemas experimentales

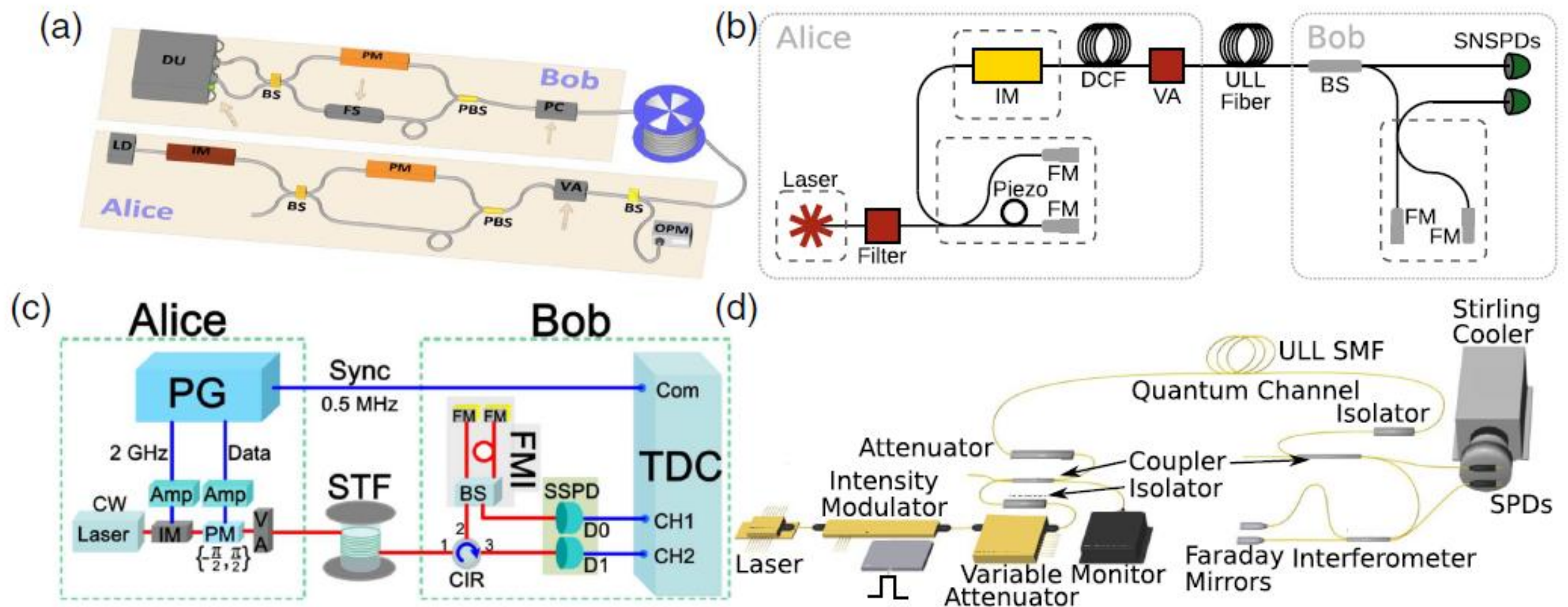
Experimental DV-QKD: SPE y Count detectors

Alice: Emisores

- a) BB84: Dos láseres pulsados a 1550nm
- b) Laser pulsado a 1550nm con fase aleatoria a 2.5GHz
- c) Láser CW a 1560nm y luego “chopeado” con IM+PM
- d) Láser CW y luego pulsado con dos IM

Bob: Receptores

- a) InGaAs APDs
- b) SNSPDs
- c) SSPDs
- d) SNSPDs



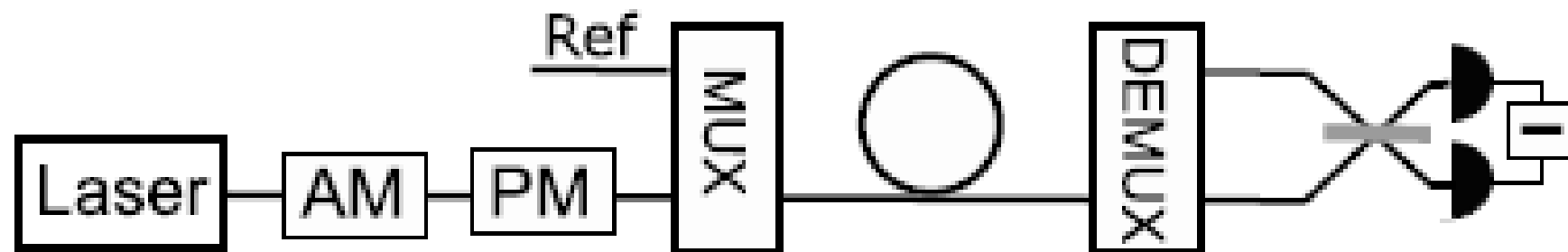
Experimental CV-QKD

Continuous Variable, CV-QKD

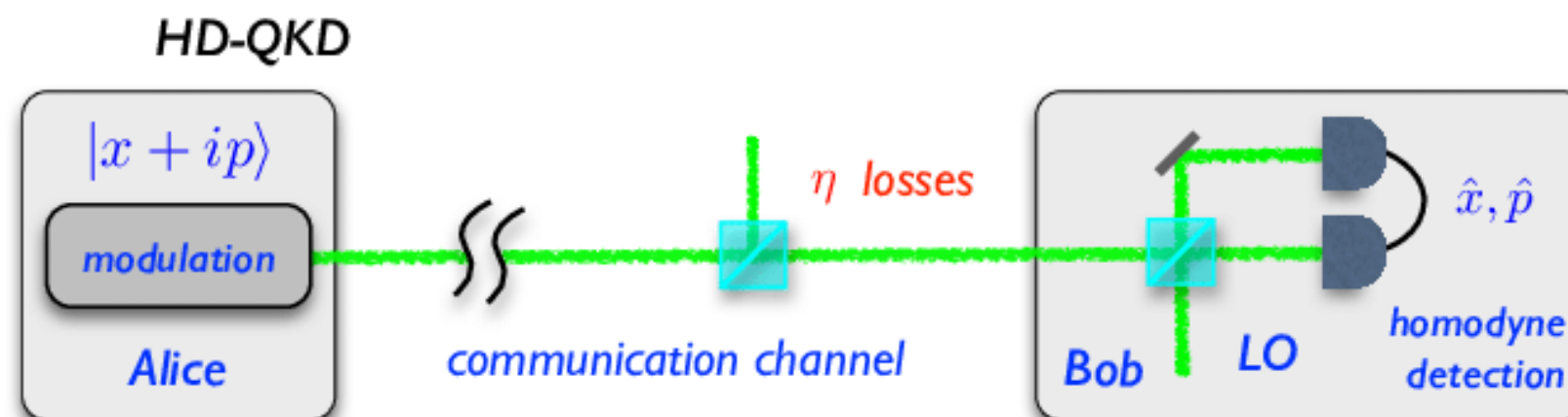
- Al contrario que en DV, la señal que sale del láser es una señal de luz continua y se utiliza detección homodina o heterodina para recuperar continuamente el valor de los cuadrantes de la luz.
- Las variables se describen mediante espacios de Hilbert de dimensión infinita y las claves se codifican en haces de luz que se emiten sin ser pulsados.
- Son tecnologías más parecidas a las comúnmente utilizadas para comunicaciones ópticas clásicas.
- Inicialmente se trabajó con láseres en el rojo (780nm aprox) pero posteriormente se ha intentado utilizar elementos ya disponibles para comunicaciones clásicas de alta velocidad, mayormente a 1550nm.
- La principal complejidad consiste en que se necesitan detectores se necesita **homodinos o heterodinos y un complejo post-procesado (EC y PA)**.

Experimental CV-QKD

- El transmisor es un láser de telecomunicaciones a menudo se transforma en un tren de pulsos utilizando un modulador de amplitud con una cierta velocidad de reloj (MHz).



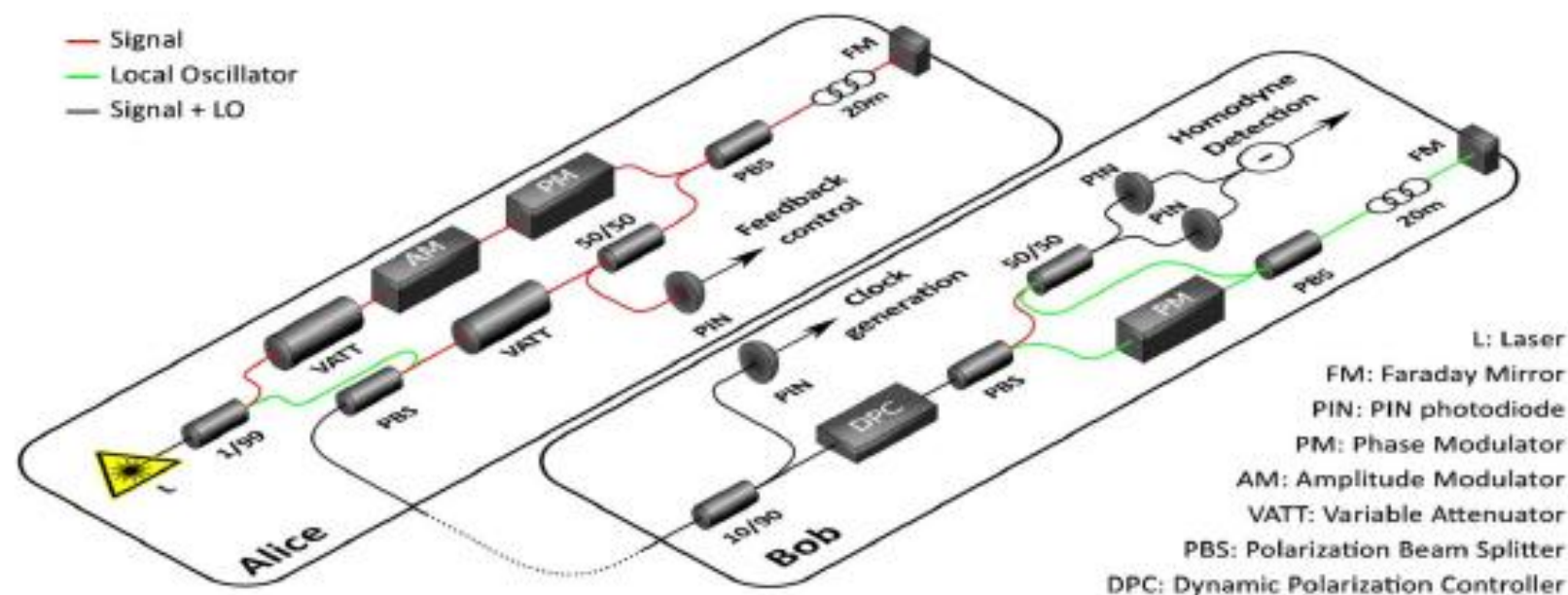
- En Bob se necesita un **detector homodino o heterodino complejo**:
 - Necesita un haz de oscilador local fuerte (LO) y dos detectores para demodular la información. Tanto Alice como Bob han de tener el mismo LO, que es de alta calidad.
 - Así se extrae la fase óptica entre la señal y la LO, y la diferencia de fotocorrientes producidas en cada uno de los dos detectores será proporcional a una de las dos cuadraturas de campo.
 - Necesita un complejo post-procesado (EC y PA).



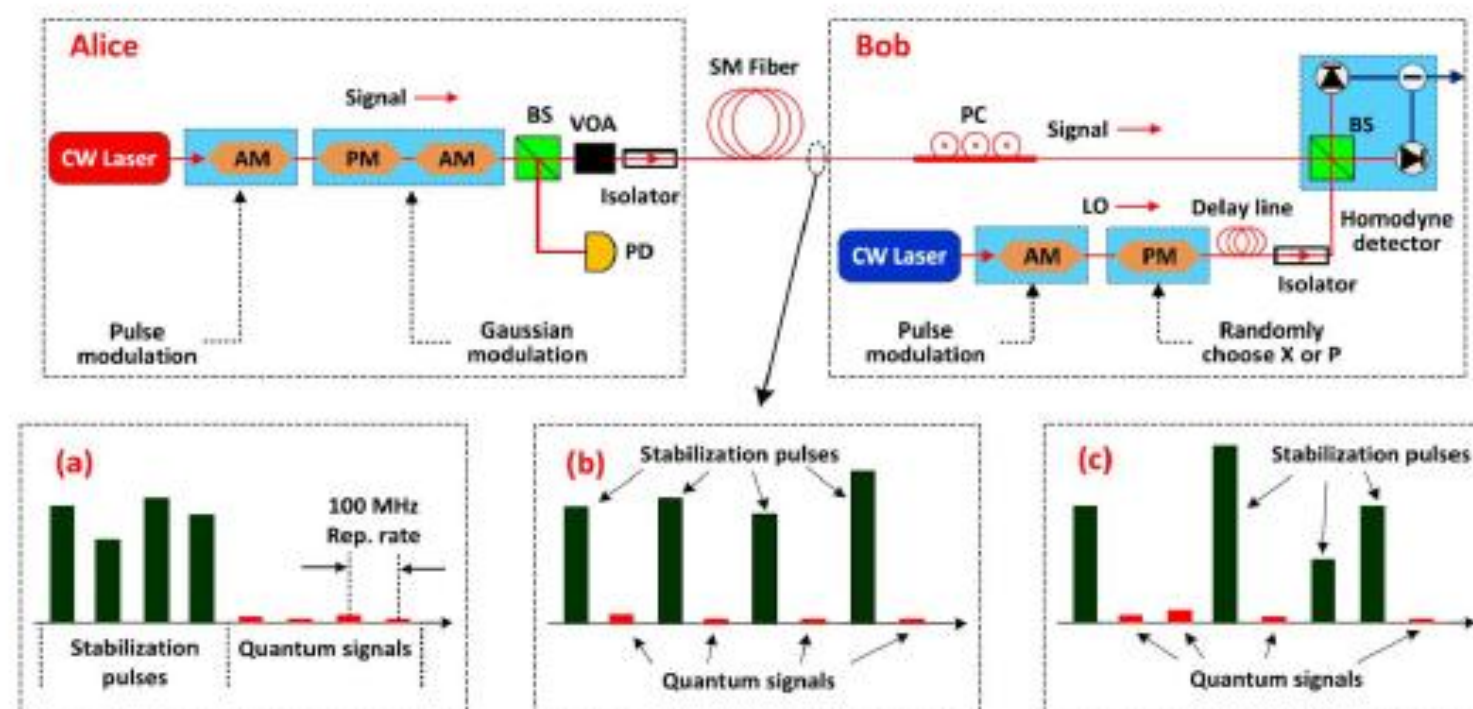
Experimental CV-QKD

Detalles de tres configuraciones experimentales para CV-QKD basadas en un alfabeto de estados coherente gaussiano.

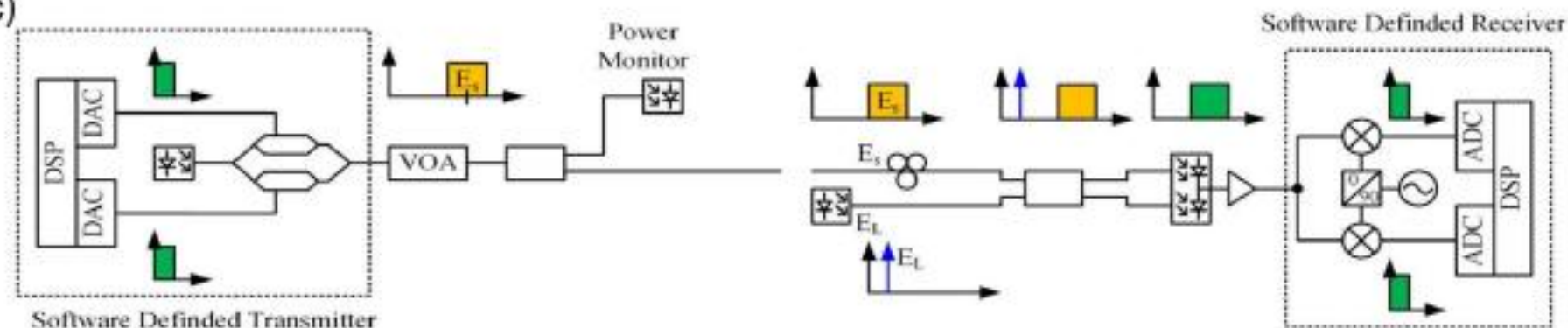
(a)



(b)



(c)



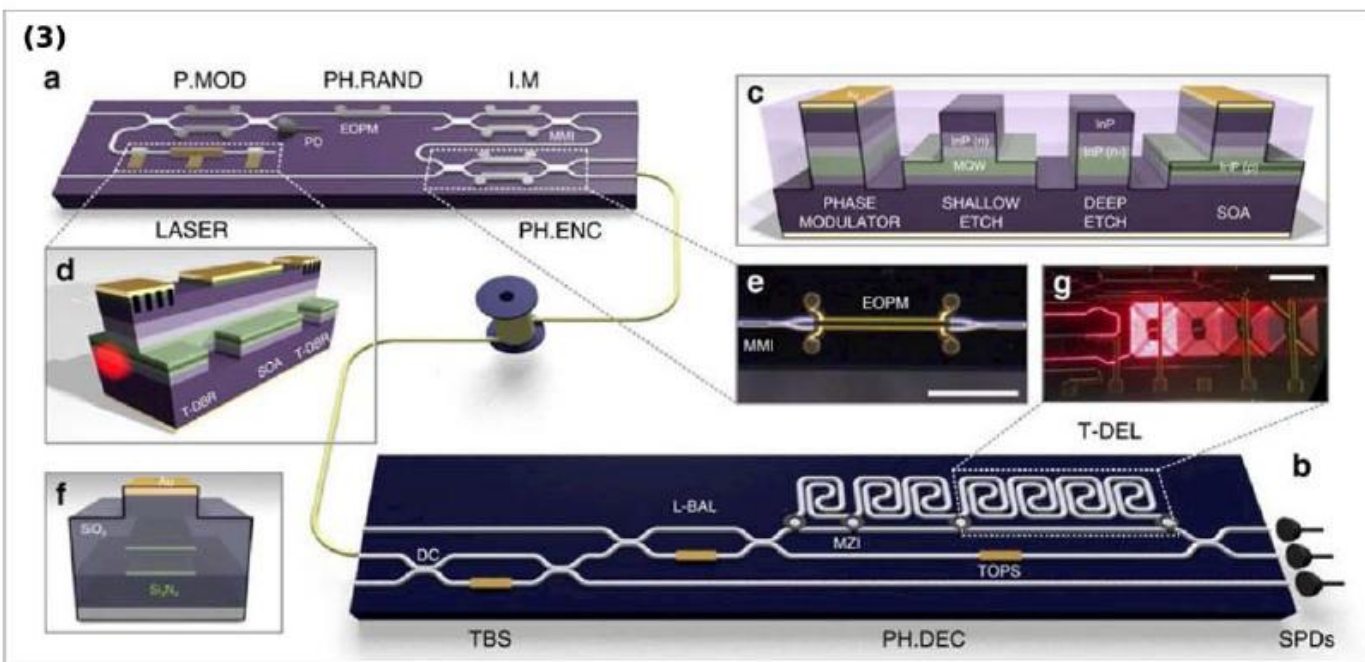
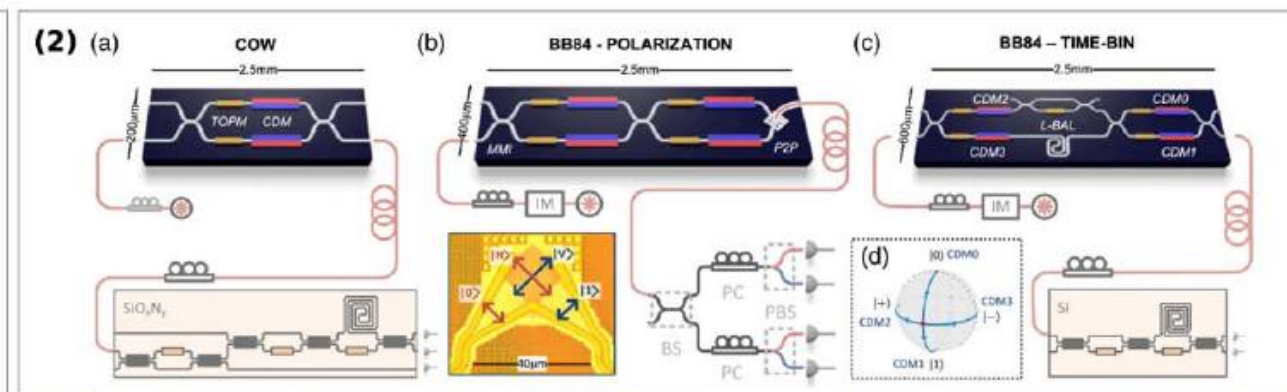
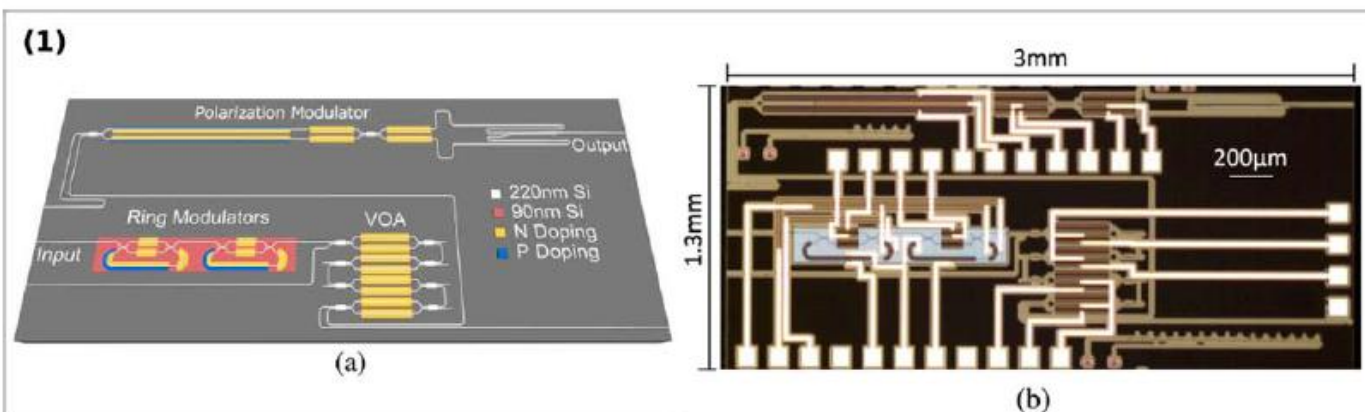
QKD en PICs

(1) Silicon Photonics, generadores basados en ring resonators

(2) Silicon Photonics: QKD-COW-BB84

(3) InP y TripleX

<https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.8.021009>



QKD en PICs

OPTICA QUANTUM

CMOS photonic integrated source of broadband polarization-entangled photons

ALEXANDER MILOSHEVSKY,^{1,*} LUCAS M. COHEN,^{2,†} KARTHIK V. MYILSWAMY,^{2,†} MUNEER ALSHOWKAN,¹ SALEHA FATEMA,² HSUAN-HAO LU,¹ ANDREW M. WEINER,² AND JOSEPH M. LUKENS^{1,3}

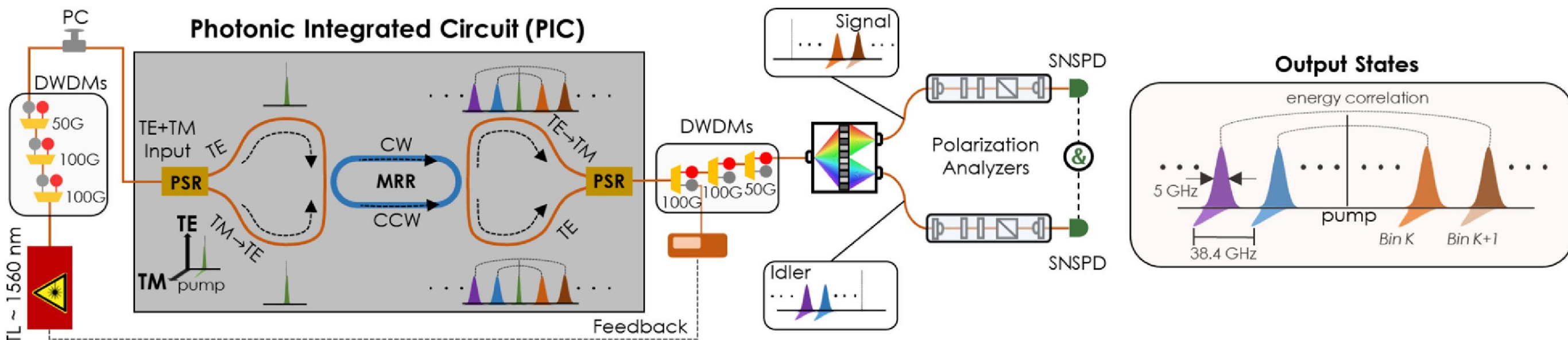
¹Quantum Information Science Section, Computational Sciences and Engineering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA

²School of Electrical and Computer Engineering and Purdue Quantum Science and Engineering Institute, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, USA

³Research Technology Office and Quantum Collaborative, Arizona State University, Tempe, Arizona 85287, USA

[†]These authors contributed equally to this work.

*miloshevskya@ornl.gov



Científicos del Laboratorio Nacional de Oak Ridge han desarrollado el primer chip que integra componentes fotónicos cuánticos clave para generar y manipular fotones entrelazados.

Alexander Miloshevsky, Lucas M. Cohen, Karthik V. Myilswamy, Muneer Alshowkan, Saleha Fatema, Hsuan-Hao Lu, Andrew M. Weiner, and Joseph M. Lukens, "CMOS photonic integrated source of broadband polarization-entangled photons," Optica Quantum 2, 254-259 (2024)

estefania.priorcano@uclm.es

Quantum Comms en España

- MADQCI: Iniciativa de instituciones públicas de Madrid
 - <https://madqci.es/>
- Barcelona Supercomputing Center
 - <https://quantumspain-project.es/>
- Galicia Quantum Technologies Hub, CESGA
 - <https://www.cesga.es/en/infrastructures/quantum/>
- País Vasco, EHU Quantum Center.
 - <https://ehuqc.eus/>
- Plan Estatal:
 - <https://www.quantumcommunicationsspain.eu/>



The screenshot shows the Quantum Spain website. The header includes the logo and navigation links: ACERCA DE, INFRAESTRUCTURA, INVESTIGACIÓN, TALENTQ, EMPLEO, MEDIA, and CONTACTO. The main content area features three large statistics: 1 ordenador cuántico (quantum computer), 27 instituciones (institutions), and 3 simuladores cuánticos HPC (quantum HPC simulators). To the right, a section titled 'Somos parte del cambio' (We are part of the change) describes the project as the first quantum computing ecosystem in the country, involving the Spanish Supercomputing Network and research institutions.

Quantum SPAIN

ACERCA DE ▾ INFRAESTRUCTURA INVESTIGACIÓN TALENTQ EMPLEO MEDIA ▾ CONTACTO

Somos parte del cambio

El primer ecosistema de computación cuántica del país

En Quantum Spain, la Red Española de Supercomputación y las **instituciones de investigación** más punteras trabajamos juntos en la creación de la primera infraestructura de computación cuántica de España, **explorando las aplicaciones de este nuevo paradigma** computacional.

Retos y trabajo futuro

Las comunicaciones cuánticas son un campo en desarrollo y prometedor.

Cada vez más gobiernos y empresas están poniendo interés en esta posible revolución.

To do list:

- **Decoherencia:** Necesidad de fuentes con mayores longitudes de coherencia. Los qubits son extremadamente sensibles a su entorno, lo que puede causar errores en la transmisión.
- **Escalabilidad:** Creación de links cuánticos a gran escala y de largo alcance.
- **Integración:** Posibilidad de convivencia con las infraestructuras de comunicación clásicas. Y mayor facilidad si se consigue con el uso de HW ya existente para comms clásicas.
- **Corrección de Errores:** La corrección de errores cuánticos es fundamental debido a la fragilidad de los estados cuánticos. Se están desarrollando algoritmos y técnicas para detectar y corregir errores sin destruir la información cuántica.
- **Infraestructura:** Mejora de los repetidores cuánticos y otros dispositivos necesarios.
- **Tamaño y condiciones de trabajo:** Con PICs y a temperatura ambiente. Además, quedan por explorar frecuencias de THz y microondas.

Bibliografía

- Paraíso, T.K., Woodward, R.I., Marangon, D.G., Lovic, V., Yuan, Z. and Shields, A.J. (2021), Advanced Laser Technology for Quantum Communications (Tutorial Review). Adv. Quantum Technol., 4: 2100062. <https://doi.org/10.1002/qute.202100062>
- Abellán Sánchez, C. Quantum random number generators for industrial applications. Tesi doctoral, UPC, Institut de Ciències Fotòniques, 2018. DOI 10.5821/dissertation-2117-120989 . Disponible en: <<http://hdl.handle.net/2117/120989>>
- Bennett, Phys. Rev. Lett. 68, 3121 (1992) <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.68.3121>
- S. Pirandola, U. L. Andersen, L. Banchi, M. Berta, D. Bunandar, R. Colbeck, D. Englund, T. Gehring, C. Lupo, C. Ottaviani, J. L. Pereira, M. Razavi, J. Shamsul Shaari, M. Tomamichel, V. C. Usenko, G. Vallone, P. Villoresi, and P. Wallden, "Advances in quantum cryptography," Adv. Opt. Photon. 12, 1012-1236 (2020)
- R. Wolf, *Quantum Key Distribution: An Introduction with Exercises*, Springer, 2021, pp. 1-229.
- **Laudenbach, C. Pacher, C.-H. F. Fung, A. Poppe, M. Peev, B. Schrenk, M. Hentschel, P. Walther, and H. Hübel, "Continuous-Variable Quantum Key Distribution with Gaussian Modulation -- The Theory of Practical Implementations," *arXiv*, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1703.09278>**

Fundamentos de Comunicaciones Cuánticas

Estefanía Prior Cano

CURSO DE COMPUTACIÓN CUÁNTICA 6.0

3-6 JUNIO

CÁCERES

ORGANIZA
Y PATROCINA:



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO



Plan de
Recuperación,
Transformación
y Resiliencia

España | digital



Quantum
SPAIN

Talento



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO



Plan de
Recuperación,
Transformación
y Resiliencia

EQI Escuela de
organización
industrial



4CAMhub

COLABORA:



COMPUTAEX
Centro de Supercomputación
de Extremadura

