

Tecnologías Cuánticas para Fotometría

Joaquín Campos, Alejandro Ferrero, José Luis Velázquez, Néstor Tejedor y Pablo Santafé-Gabarda

Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Óptica “Daza de Valdés” C/ Serrano, 144.
28006 Madrid
Tefno. 915616800- E-mail: joaquin.campos@csic.es.

RESUMEN: Se presentan diversas facetas en las que los principios de la física cuántica y las tecnologías basadas en ellos se han utilizado, se están utilizando o se podrían usar en el futuro para que las magnitudes fotométricas se puedan determinar con menor incertidumbre. A raíz de las investigaciones realizadas en proyectos de los programas i-MERA+, EMRP y EMPIR, los laboratorios nacionales e institutos designados europeos están desarrollando una amplia labor en este campo. Los radiómetros cuánticos eficientes predecibles están alcanzando límites de incertidumbre comparable a los más exactos disponibles en la actualidad, pero sin necesitar instalaciones experimentales tan costosas. Las fuentes de emisión monofotónicas parecen estar llamadas a jugar un papel estelar en el desarrollo futuro de la Fotometría y la Radiometría como nuevos patrones primarios absolutos.

1. INTRODUCCIÓN

El informe “Principles Governing Photometry” del Buró Internacional de Pesos y Medidas (BIPM) [1] recoge las definiciones de las magnitudes fotométricas, sus símbolos, unidades y las ecuaciones básicas que relacionan las magnitudes fotométricas con sus correspondientes radiométricas, de manera que una magnitud fotométrica, por ejemplo la intensidad luminosa, I_v , se obtendría a partir de la correspondiente radiométrica según la ecuación:

$$I_v = K_{cd} \int_0^{\infty} I_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Donde K_{cd} es la constante de eficacia luminosa que define el sistema internacional de unidades SI, $I_{e,\lambda}(\lambda)$ es la intensidad radiante espectral a la longitud de onda λ y $V(\lambda)$ la curva de eficiencia luminosa espectral, que está definida entre 360 nm y 830 nm. Los límites de integración vienen fijados por la definición de $V(\lambda)$, pero en la práctica pueden encontrarse valores ligeramente diferentes, en particular para el límite superior que suele tomarse a 780 nm. Por tanto, para determinar la magnitud fotométrica se puede integrar espectralmente la correspondiente radiométrica; es decir, el contenido energético de la radiación en cuestión y las pertinentes magnitudes geométricas. Esta forma de proceder es la más habitual hoy en día en los laboratorios de mayor rango metrológico en este campo (nacionales y designados), en particular tras la aprobación de la redefinición de la candela en el año 1979, independizándola de fuentes emisión.

La realización práctica de las unidades correspondientes a estas magnitudes fotométricas se recoge en el documento “Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the SI” [2]. En él se indica que el contenido energético se puede determinar de dos formas esencialmente: midiendo la potencia del campo radiante o contando el número de fotones que contiene esa radiación. En este caso, la ecuación anterior se escribiría de la forma:

$$I_v = K_p \int_0^{\infty} I_p(\lambda) \frac{n_a(\lambda)V(\lambda)}{\lambda} d\lambda \quad (2)$$

Donde $I_p(\lambda)$ es la intensidad radiante espectral expresada en número de fotones, $n_a(\lambda)$ es el índice de refracción del aire, que depende la longitud de onda, y

$$K_p = K_{cd}hc \quad (3)$$

siendo h la constante de Planck y c la velocidad de la luz en el vacío.

Los principios de la física cuántica juegan un papel destacado tanto en la medida de flujo radiante como en el empleo de fuentes o detectores de fotones. En esta comunicación se presenta un recorrido por los hitos de los principios de la física cuántica en la medida de magnitudes radiométricas y fotométricas, así como por las líneas de investigación que se desarrollan hoy día en torno a ellos.

2. PRINCIPIOS CUÁNTICOS EN LA MEDIDA DE LA RADIACIÓN ÓPTICA

La medida del flujo radiante asociado a la radiación óptica se basa hoy en día en dos principios físicos:

- El calentamiento que se produce por la absorción de la radiación en un sistema que, a su vez, da lugar al cambio de una propiedad del mismo, generalmente eléctrica, que se mide y se relaciona con la potencia absorbida.
- El efecto fotoeléctrico interno o externo que se produce en ciertos materiales, principalmente semiconductores, que permite relacionar el número de portadores de carga generados con el número de fotones absorbidos.

En el segundo de estos principios es donde interviene la Física Cuántica. La relación entre el número de portadores de carga que se pueden registrar y el número de fotones absorbidos se denomina eficiencia cuántica interna. Su conocimiento en un sistema lo convierte en un radiómetro, potencialmente absoluto, puesto que, por ejemplo en el caso de un fotodiodo, la responsividad espectral (cantidad de respuesta por unidad de flujo radiante incidente) viene dada por la ecuación:

$$R(\lambda) = [1 - \rho(\lambda)] \cdot \eta(\lambda) \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (4)$$

Donde $\rho(\lambda)$ es la reflectancia espectral del fotodiodo, $\eta(\lambda)$ es la eficiencia cuántica interna, e es la carga del electrón, λ es la longitud de onda en el vacío, h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz en el vacío.

2.1. Eficiencia cuántica interna de fotodiodos.

El estudio de la eficiencia cuántica interna de fotodiodos de silicio ha sido el más fructífero hasta la fecha. Se inició a finales de la década de los setenta con la investigación de los fenómenos físicos que impedían que por cada fotón absorbido se consiguiera registrar un electrón en la corriente de cortocircuito de un fotodiodo de unión $p-n$; es decir, que la eficiencia cuántica interna fuera unidad [3]. Se han desarrollado modelos para la respuesta de ese tipo de fotodiodo basados en sus parámetros físicos (eléctricos y geométricos) [4, 5, 6] que han permitido la realización de escalas radiométricas en distintos institutos nacionales de metrología o designados, como es el caso del Instituto de Óptica [7]. El modelo más utilizado, quizás por ser el más simple, es el que se indica en la ecuación siguiente.

$$\eta(\lambda) = P_f + \frac{P_r - P_f}{\alpha(\lambda) \cdot T} \{1 - \exp[-\alpha(\lambda) \cdot T]\} \quad (5)$$

Donde $\alpha(\lambda)$ es el coeficiente de absorción espectral del fotodiodo, P_f es la probabilidad de recolección de portadores en la parte frontal del diodo, P_r es la probabilidad de recolección de portadores en la parte posterior del diodo y T es una longitud característica del diodo en la que la probabilidad de recolección de portadores de carga pasa desde el valor frontal al posterior, que está relacionada con los parámetros de diseño de la unión.

Los modelos anteriores no funcionaban bien para las longitudes de onda más cortas (< 450 nm aproximadamente) ni para las más largas del espectro (> 800 nm, aproximadamente), pues la absorción de radiación se produce casi exclusivamente en la parte frontal del fotodiodo en el primer caso y de forma notable en la parte posterior en el segundo caso. Esto se debía a que en la estructura de los fotodiodos de unión $p-n$ los modelos no explicaban bien los fenómenos de recombinación en la zona próxima a la interfaz de entrada ni los que suceden en el volumen tras la región de la unión. Los fotodiodos conocidos como de capa de inversión (“inversion layer” en inglés) aportaron una solución para el intervalo espectral corto [8, 9], pues en ellos se evita en gran medida la recombinación de portadores fotogenerados en la región frontal. Estos fotodiodos se aplicaron a la medida de magnitudes fotométricas [10].

2.2. Detectores cuánticos eficientes predecibles (PQED).

Basándose en el concepto de fotodiodos de inversión y utilizando las nuevas herramientas de diseño y simulación de dispositivos semiconductores que han ido surgiendo, se han desarrollado en el ámbito de EURAMET los proyectos de investigación que se indican en la tabla 1 con los que se han diseñado y construido detectores basados en fotodiodos de inversión que se conocen como detectores cuánticos eficientes predecibles.

Nombre del proyecto	Programa de investigación	Periodo de ejecución
The Quantum Candela	iMERA (séptimo programa marco, ERA-NET Plus)	2008-2011
New primary standards and traceability for radiometry	EMRP	2013-2016
Self-calibrating photodiodes for the radiometric linkage to fundamental constants	EMPIR	2019-2022

Tabla 1. Proyectos en los que se han ido desarrollando los detectores cuánticos eficientes predecibles

Los programas de simulación de funcionamiento de un fotodiodo de unión han permitido modelar los fenómenos físicos responsables de la recombinación de los portadores fotogenerados antes de su recolección en el circuito eléctrico externo y los parámetros de diseño que contribuyen a la minimización de la recombinación prematura. Así se ha diseñado una estructura ideal que ha podido ser construida con alta fidelidad al diseño, cuya eficiencia cuántica interna es alta y predecible, por lo que se ha conseguido un radiómetro absoluto.

Con estos fotodiodos se ha alcanzado una incertidumbre estimada relativa en la medida de flujo radiante de $1 \cdot 10^{-4}$ a temperatura ambiente y de $1 \cdot 10^{-6}$ a temperaturas criogénicas, similares a las estimadas para los radiómetros criogénicos de sustitución eléctrica ($1 \cdot 10^{-5}$). Además, se ha alcanzado un acuerdo entre ambos radiómetros midiendo flujo radiante a ciertas longitudes de onda que está dentro de la incertidumbre de la comparación [11].

Las principales innovaciones en la realización de estos radiómetros han estado relacionados con el diseño de la interfaz entre la capa de pasivación y el cuerpo del fotodiodo, que es donde se acumula la carga eléctrica que crea el diodo de inversión [12] minimizando la creación de centros de recombinación para los portadores excitados por la absorción de radiación.

3. FUENTES DE UN ÚNICO FOTÓN (MONOFOTÓNICAS)

Una fuente de un único fotón (monofotónica) perfecta nunca emite dos o más fotones simultáneamente. Esto la distingue de las fuentes de luz coherentes (láseres) y de las fuentes de luz térmicas, como las bombillas incandescentes. Los fotones únicos pueden ser producidos por átomos individuales, iones, moléculas, centros de color y puntos cuánticos. Todos ellos son sistemas que tienen que ser re-excitados antes de la emisión de un segundo fotón. Las fuentes de fotones únicos basadas en este principio se denominan fuentes de fotones únicos deterministas. Otra forma posible de generar fotones únicos es el uso de la conversión paramétrica descendente espontánea. En este caso, se producen pares de fotones únicos mediante un proceso no lineal. Este tipo tiene la ventaja añadida de que la detección de un fotón en una trayectoria del haz anuncia un fotón único en la otra trayectoria correspondiente. Estas fuentes se denominan "fuentes monofotónicas probabilísticas".

Entre las aplicaciones más destacadas para estas fuentes están la distribución de claves cuánticas, la comunicación cuántica, la informática cuántica y la metrología cuántica [13]. Sin embargo, hasta ahora, las fuentes monofónicas no presentan mejores prestaciones en estos campos que fuentes láser, que han alcanzado un alto desarrollo. Un campo específico en el que se ha demostrado la ventaja de estas fuentes es la radiometría cuántica [14]: fuentes fotónicas patrones (como ya existen el radiador de cuerpo negro y la fuente de radiación de sincrotrón), metrología en la que se necesita que el ruido esté por debajo del tipo shot, la calibración de sensores de pocos fotones o la "candela cuántica".

Un dispositivo con una fuente monofotónica perfecta, que, bajo excitación con un láser pulsado, emitiera exactamente un fotón por pulso de excitación, y que operara con una tasa de repetición f , emitiría un flujo radiante $\Phi = f h c / \lambda$, donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y λ la longitud de onda de la radiación emitida, y sería, por tanto, una fuente patrón de flujo radiante. Además, dado que c y h no tienen incertidumbre, y que la frecuencia y la longitud de onda pueden medirse con incertidumbres relativas en el rango de 10^{-17} y 10^{-12} , respectivamente, el flujo radiante emitido podría determinarse con una incertidumbre muy por debajo del estado actual de la técnica, alcanzado utilizando el radiómetro criogénico, que tiene incertidumbres en el rango de 10^{-5} [15]. Sin embargo, esto requiere una fuente perfecta, es decir, una fuente con una eficiencia cuántica del 100% (es decir, cada excitación conduce a la emisión de un fotón), una pureza perfecta de la emisión de un solo fotón, es decir, $g^{(2)}(0) = 0$.

Por otro lado, las fuentes monofotónicas serían fuentes ideales para la calibración de los detectores monofotónicos, ya que la corrección necesaria para la estadística de los fotones cuando se utiliza una fuente láser se eliminaría completamente o, al menos, se disminuiría significativamente en el caso de las fuentes monofotónicas imperfectas [16, 17]).

La primera caracterización metrológica completa de una fuente monofotónica con respecto al flujo de radiación espectral absoluto fue realizada por Rodiek et al. [18]. Se trataba de una fuente monofotónica basada en un centro vacante de nitrógeno (NV). La incertidumbre estándar para el flujo de fotones fue aproximadamente el 4% [19]. El flujo radiante total estaba entre 55 fW y 75 fW, (190 000 fotones por segundo y 260 000 fotones por segundo, respectivamente). La pureza de la emisión de un solo fotón, indicada por $g^{(2)}(0)$, era 0,10 y 0,23, respectivamente, dependiente de la potencia de excitación.

Otros tipos de fuentes monofotónicas basadas en moléculas individuales y puntos cuánticos semiconductores, ambos incrustados en estructuras dieléctricas para mejorar la eficiencia de la recolección, se están investigando. En la tabla 2 se muestran valores publicados para las distintas fuentes que se están investigando.

Tipo de fuente	Centro de impureza en nano-diamante	Molécula individual	Punto cuántico semiconductor
Emisor	NV	DBT:Ac	InGaAs
N_{ph} (fotones/s)	2.6×10^5	1.32×10^6	2.55×10^6
$\Delta\lambda$	≈ 100 nm	< 0.2 nm	< 42 pm
$N_{ph,\lambda}(\lambda)$ (fotones/(nm s))	≈ 1100 (@ ≈ 685 nm)	1.32×10^6 (@ 785.6 nm)	2.55×10^6 (@ 929.8 nm)
$g^{(2)}(\tau=0)$	0.23	0.08	0.24
T / K	Temperatura ambiente	3	10

Tabla 2. Características radiométricas de algunas fuentes monofotónicas [20]

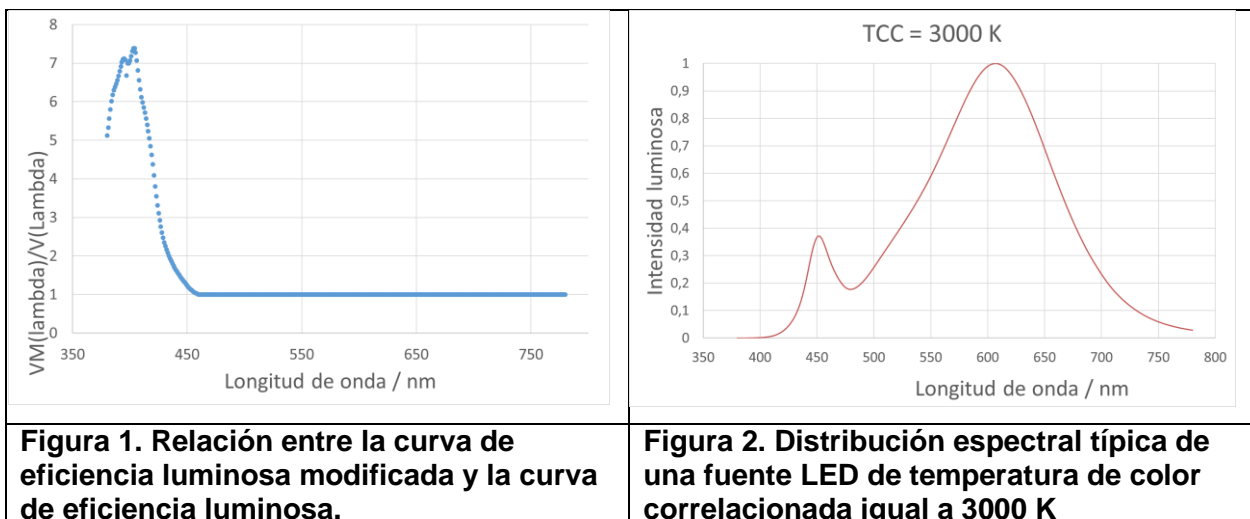
Como se puede observar, los mejores resultados hasta ahora en todos los parámetros se han obtenido con la fuente de puntos cuánticos semiconductores InGaAs/GaAs.

Según se observa en la literatura [20], los próximos pasos son el diseño y la fabricación de estructuras optimizadas para mejorar aún más la eficiencia de desacoplamiento y, por tanto, el flujo de fotones individuales. Además, es importante reducir el valor de $g^{(2)}(t=0)$ para evitar problemas con los eventos multifotónicos en caso de altas tasas de fotones. No obstante, parece claro que se necesita un mayor desarrollo tecnológico para alcanzar fuentes monofotónicas que se puedan usar como patrones radiométricos.

Los principales resultados alcanzados en el uso de fuentes monofotónicas en radiometría han sido fruto de los proyectos de investigación “Single-photon sources for quantum technologies” (SIQUTE, Project Number: EXL02 del programa EMRP), “Single-photon sources as new quantum standards” (SIQUST, Project Number: 17FUN06, del programa EMPIR) y “Single- and entangled photon sources for quantum metrology” (SEQUME, Project Number: 20FUN05, del programa EMPIR).

4. CURVA DE EFICIENCIA LUMINOSA

La curva de eficiencia luminosa, $V(\lambda)$, junto con la constante del SI K_{cd} establecen la cantidad de magnitud fotométrica asociada a la radiación visible por el ojo humano, véase (1). La curva $V(\lambda)$ fue adoptada por la Comisión Internacional de iluminación (CIE) en el año 1924 y es sabido que presenta deficiencias en la región de longitudes de onda más cortas. La propia CIE ha publicado otra curva de eficiencia espectral, denominada $V_M(\lambda)$, que corrige esos valores (véase la **Fig. 1**). Sin embargo, esa curva modificada no ha sido adoptada para sustituir a la curva de eficiencia espectral original en el ámbito de la fotometría, alegando que no se usaba en la práctica porque las diferencias no eran sustantivas. Pero la aparición de las fuentes LED, cuya emisión en la zona de longitudes de onda cortas es importante (**Fig. 2**), podría hacer necesario reconsiderar esta situación y establecer una nueva curva de eficiencia luminosa más próxima al comportamiento del ojo humano.



La curva de eficiencia luminosa se determinó igualando la sensación de luminosidad de estímulos de anchura espectral pequeña. Cabría plantearse si se podría determinar esa curva de eficiencia de forma más fidedigna a partir de la distribución espectral de los umbrales de sensibilidad. En esa determinación las fuentes monofotónicas podrían usarse controlando el número de fotones dentro del tiempo de respuesta del ojo humano hasta que el observador indicara la percepción de luz. El estado del arte de las fuentes monofotónicas no permite aún la realización de esta detección de umbral para el régimen de visión fotópica que representa la curva $V(\lambda)$, pues se necesita la emisión de un número de fotones muy grande en un periodo de tiempo corto, pero cabría plantearse el experimento para el régimen de visión escotópica (baja iluminación), siguiendo la estela de un experimento realizado en los últimos años, que ha puesto de manifiesto que el ojo humano puede detectar un único fotón [21], al menos para frecuencias próximas a la de máxima sensibilidad. A partir de esa curva umbral escotópica cabría plantearse la estimación de la fotópica utilizando el conocimiento adquirido sobre el mecanismo de la visión o intentando

determinar el umbral fotópico a partir de un experimento visual también. Hasta la fecha ninguna de estas ideas ha sido explotada.

5. CONCLUSIONES

La aplicación de los principios de la física cuántica a la Radiometría y Fotometría ha dado lugar al diseño y construcción de radiómetros absolutos, los radiómetros cuánticos eficientes predecibles (PQED), capaces de medir con una incertidumbre estimada comparable a la de los radiómetros criogénicos de sustitución eléctrica con un equipamiento mucho más simple.

Se están desarrollando fuentes monofotónicas (single photon sources en inglés) que, muy probablemente, podrán usarse como emisores patrones primarios absolutos, dando lugar a una nueva forma de realización de la candela, y como una herramienta muy útil para la caracterización radiométrica de detectores de pocos fotones.

Esas mismas fuentes monofotónicas podrían ser una herramienta muy útil para una nueva determinación de la curva de eficiencia luminosa del observador humano.

6. REFERENCIAS

- [1] Bureau International des Poids et Mesures, "Principles Governing Photometry", 2nd edition, Rapport BIPM-2019/05, Pavillon de Breteuil, F-92312 SÈVRES Cedex, France, 2019.
- [2] Consultative Committee for Photometry and Radiometry, SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2 v1.02, 2021. "*Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the SI*".
- [3] E. F. Zalewski and J. Geist, "Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration" Appl. Opt. 19, 1214-1216 (1980).
- [4] T. R. Gentile, J. M. Houston, and C. L. Cromer, "Realization of a scale of absolute spectral response using the National Institute of Standards and Technology high-accuracy cryogenic radiometer" Appl. Opt. 35, 4392-4403 (1996).
- [5] A. Ferrero, J. Campos, A. Pons, and A. Corrons, "New model for the internal quantum efficiency of photodiodes based on photocurrent analysis" Appl. Opt. 44, 208-216 (2005).
- [6] T. R. Gentile, S. W. Brown, K. R. Lykke, P. S. Shaw, and J. T. Woodward, "Internal quantum efficiency modeling of silicon photodiodes" Appl. Opt. 49, 1859-1864 (2010).
- [7] J. Campos, A. Pons and P. Corredera, "Spectral responsivity scale in the visible range based on single silicon photodiodes", Metrologia 40 (2003) S181–S184.
- [8] T. E. Hansen, "Silicon UV-Photodiodes Using Natural Inversion Layers", Phys. Scr. 18 (1978), 471.
- [9] J. Geist, E. Liang, and A. R. Schaefer, "Complete collection of minority carriers from the inversion layer in induced junction diodes", J. App. Phys. 52 (1981), 4879.
- [10] Y. Ohno, Determination of the Photometric Quantities by the Silicon Photodiode Self-Calibration Using Lasers, Journal of Light & Visual Environment, 1991, Volume 15, Issue 2, Pages 2_52-2_59.
- [11] Timo Dönsberg et al, "A primary standard of optical power based on induced-junction silicon photodiodes operated at room temperature", Metrologia 51 (2014), 197.
- [12] O. Koybasi, Ø. Nordseth, T. Tran, M. Povoli, et al., "High Performance Predictable Quantum Efficient Detector Based on Induced-Junction Photodiodes Passivated with SiO₂/SiNx". Sensors 21, (2021), 7807.

- [13] N. Sangouard, H. Zbinden, “*What are single photons good for?*” *J. Mod. Opt.* **59** (2012), 1458.
- [14] C. J. Chunnillal, I. P. Degiovanni, S. Kück, I. Müller, A. G. Sinclair, “*Metrology of single-photon sources and detectors: a review*”. *Opt. Eng.* **53** (2014), 081910.
- [15] A. Sperling, S.T. Kück, “*The SI unit candela*”. *Ann. Phys.* **531** (2019), 5.
- [16] M. López, H. Hofer, S. Kück, “*Detection efficiency calibration of single-photon silicon avalanche photodiodes traceable using double attenuator technique*”. *J. Mod. Opt.* **62** (2015), S21–S27.
- [17] W. Schmunk et al., “*Radiometric calibration of single photon detectors by a single photon source based on NV-centers in diamond*”. *J. Mod. Opt.* **58** (2011), 1252.
- [18] B. Rodiek, M. López, H. Hofer, G. Porrovecchio, M. Šmid, X.-L. Chu, S. Götzinger, V. Sandoghdar, S. Lindner, C. Becher, S. Kück, “*Experimental realization of an absolute single-photon source based on a single nitrogen vacancy center in a nanodiamond*”. *Optica* **4** (2017), 71 (2017).
- [19] B. Rodiek, M. López, H. Hofer, S. Kück, “*The absolutely characterized nitrogen vacancy center-based single-photon source—measurement uncertainty of photon flux and angular emission properties*”. *J. Phys.: Conf. Ser.* **972** (2018), 012008.
- [20] Kück, S., López, M., Hofer, H. et al. “*Single photon sources for quantum radiometry: a brief review about the current state-of-the-art*”. *Appl. Phys. B* **128** (2022), 28.
- [21] Tinsley, J., Molodtsov, M., Prevedel, R. et al. “*Direct detection of a single photon by humans*”. *Nat Commun* **7**, 12172 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms12172>.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del programa de actividades “Sensores e instrumentación en tecnologías fotónicas 2” (SINFOTON2-CM, P2018/NMT-4331) financiado en la convocatoria de Programas de Actividades de I+D entre grupos de investigación de la Comunidad de Madrid en tecnologías 2018, cofinanciada con los programas operativos del Fondo Social Europeo y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional, 2014-2020, de la Comunidad de Madrid.