

Fluctuaciones cuánticas: metrología, polarización, no clasicidad, coherencia y fase

Quantum fluctuations: metrology, polarization, nonclassicality, coherence and phase

Alfredo Luis

Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain

(*) Email: alluis@fis.ucm.es

Recibido / Received: 30/10/2010. Aceptado / Accepted: 15/12/2010

RESUMEN:

Se presenta un breve resumen de la investigación desarrollada por el autor y colaboradores en el Departamento de Óptica de la Universidad Complutense. Entre otros temas se centra en metrología cuántica, estados de luz no clásicos, polarización y diferencia de fase en óptica cuántica, coherencia entre ondas vectoriales en óptica clásica y óptica en el espacio de fase en óptica clásica y cuántica.

Palabras clave: Metrología Cuántica, Polarización, Estados No Clásicos, Coherencia, Interferometría.

ABSTRACT:

This is a brief presentation of the research carried out by the author and collaborators in the Optics Department of the Complutense University. This focus on quantum metrology, nonclassical states of light, polarization and relative phase in quantum optics, coherence between vectorial waves in classical optics, and the phase-space approach in classical and quantum optics.

Keywords: Quantum Metrology, Polarization, Nonclassical States, Coherence, Interferometry.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1]. <http://www.ucm.es/info/gioq/alfredo.html>
- [2]. A. Luis, L. L. Sánchez-Soto, "Breaking the standard quantum limit for interferometric measurements", *Opt. Commun.* **89**, 140-144 (1992).
- [3]. A. Luis, L. L. Sánchez-Soto, "Phase-difference operator", *Phys. Rev. A* **48**, 4702-4708 (1993).
- [4]. A. Luis, J. Peřina, "Zeno effect in parametric down-conversion", *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4340-4343 (1996).
- [5]. A. Luis, L. L. Sánchez-Soto, "Quantum atom-field relative phase in the Jaynes-Cummings model", *Opt. Commun.* **133**, 159-164 (1997).
- [6]. A. Luis, L. L. Sánchez-Soto, "Complementarity enforced by random classical phase kicks," *Phys. Rev. Lett.* **81**, 4031-4035 (1998).
- [7]. A. Luis, L. L. Sánchez-Soto, "Anti-Zeno effect in parametric down-conversion", *Phys. Rev. A* **57**, 781-787 (1998).
- [8]. A. Luis, L. L. Sánchez-Soto, "Dynamical analysis of seemingly interaction-free measurements", *Phys. Rev. A* **58**, 836-839 (1998).
- [9]. A. Luis, L. L. Sánchez-Soto, "Quantum phase difference, phase measurements and Stokes operators", *Prog. Optics* **41**, 421-481 (2000).
- [10]. A. Luis, "Degree of polarization in quantum optics", *Phys. Rev. A* **66**, 013806 (2002).
- [11]. A. Luis, "Visibility for anharmonic fringes", *J. Phys. A: Math. Gen.* **35**, 8805-8815 (2002).
- [12]. A. Luis, "Complementarity for generalized observables", *Phys. Rev. Lett.* **88**, 230401 (2002).

- [13]. A. Luis, "Complementarity and duality relations for finite-dimensional systems", *Phys. Rev. A* **67**, 032108 (2003).
- [14]. A. Luis, "Classical and quantum polarization correlations", *Phys. Rev. A* **69**, 023803 (2004).
- [15]. A. Luis, "Optimum quantum states for interferometers with fixed and moving mirrors", *Phys. Rev. A* **69**, 045801 (2004).
- [16]. L. M. Johansen, A. Luis, "Nonclassicality in weak measurements", *Phys. Rev. A* **70**, 052115 (2004).
- [17]. A. Luis, "Degree of polarization for three-dimensional fields as a distance between correlation matrices", *Opt. Commun.* **253**, 10-14 (2005).
- [18]. A. Luis, "Quantum polarization distributions via marginals of quadrature distributions", *Phys. Rev. A* **71**, 053801 (2005).
- [19]. A. Luis, "Scalar Wigner function for vectorial fields and spatial-angular Stokes parameters", *Opt. Commun.* **246**, 437-443 (2005).
- [20]. A. Luis, "Properties of spatial-angular Stokes parameters", *Opt. Commun.* **251**, 243-253 (2005).
- [21]. A. Luis, "Ray picture of polarization and coherence in a Young interferometer", *J. Opt. Soc. Am. A* **23**, 2855-2860 (2006).
- [22]. A. Luis, "Gaussian beams and minimum diffraction", *Opt. Lett.* **31**, 3644-3646 (2006).
- [23]. A. Luis, "Nonclassical polarization states", *Phys. Rev. A* **73**, 063806 (2006).
- [24]. A. Luis, N. Korolkova, "Polarization squeezing and nonclassical properties of light", *Phys. Rev. A* **74**, 043817 (2006).
- [25]. A. Luis, "Negativity, diffraction and interference for nongeometrical waves", *Opt. Commun.* **266**, 426-432 (2006).
- [26]. A. Luis, "Complementary Huygens principle for geometrical and nongeometrical optics", *Eur. J. Phys.* **28**, 231-240 (2007).
- [27]. A. Luis, "Degree of coherence for vectorial electromagnetic fields as the distance between correlation matrices", *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 1063-1068 (2007).
- [28]. A. Luis, "Quantum limits, nonseparable transformations, and nonlinear optics", *Phys. Rev. A* **76**, 035801 (2007).
- [29]. A. Luis, "Maximum visibility in interferometers illuminated by vectorial waves", *Opt. Lett.* **32**, 2191-2193 (2007).
- [30]. A. Luis, "Polarization ray picture of coherence for vectorial electromagnetic waves", *Phys. Rev. A* **76**, 043827 (2007).
- [31]. A. Luis, "A SU(3) Wigner function for three-dimensional systems", *J. Phys. A* **41**, 495302 (2008).
- [32]. A. Luis, "An overview of coherence and polarization properties for multicomponent electromagnetic waves", en *Advances in Information Optics and Photonics, International Commission for Optics VI*, A. T. Friberg, R. Dändliker, Edts., pp 171-188 SPIE (2008).
- [33]. A. Luis, "Modulation of coherence of vectorial electromagnetic waves in the Young interferometer", *Opt. Lett.* **33**, 1497-1499 (2008).
- [34]. P. Réfrégier, A. Luis, "Irreversible effects of random unitary transformations on coherence properties of partially polarized electromagnetic fields", *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 2749-2757 (2008).
- [35]. A. Rivas, A. Luis, "Intrinsic metrological resolution as a distance measure and nonclassical light", *Phys. Rev. A* **77**, 063813 (2008).
- [36]. A. Luis, "Quantum-classical correspondence for visibility, coherence, and relative phase for multidimensional systems", *Phys. Rev. A* **78**, 025802 (2008).
- [37]. A. Luis, L. M. Sanchez-Brea, "Ray picture of diffraction gratings", *Opt. Commun.* **282**, 2009-2015 (2009).
- [38]. A. Rivas, A. Luis, "Nonclassicality of states and measurements by breaking classical bounds on statistics", *Phys. Rev. A* **79**, 042105 (2009).
- [39]. A. Luis, "Ensemble approach to coherence between two scalar harmonic light vibrations and the phase difference", *Phys. Rev. A* **79**, 053855 (2009).

- [40]. A. Luis, "Coherence, polarization, and entanglement for classical light fields", *Opt. Commun.* **282**, 3665-3670 (2009).
- [41]. A. Luis, "Quantum-limited metrology with nonlinear detection schemes", *SPIE Reviews* **1**, 018006 (2010).
- [42]. A. Rivas, A. Luis, "Precision quantum metrology and nonclassicality in linear and nonlinear detection schemes", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 010403 (2010).
- [43]. A. Luis, "Coherence versus interferometric resolution", *Phys. Rev. A* **81**, 065802 (2010).
- [44]. A. Luis, "Coherence and visibility for vectorial light", *J. Opt. Soc. Am. A* **27**, 1764-1769 (2010).

1. Introducción

La física cuántica presenta características muy sugerentes. Las que han llamado más nuestra atención son: (i) Fluctuaciones de carácter fundamental que no pueden eliminarse debido a la necesidad de satisfacer las relaciones de incertidumbre. Esto compromete las aplicaciones prácticas de la luz al añadir una fuente inevitable de indeterminación. (ii) Complementariedad, entendida como que la observación de una propiedad impide la observación de otras, lo que no tiene análogo clásico. (iii) La física cuántica debe acomodar lo esencial de la física clásica y a la vez permitir fenómenos incompatibles con ella, lo que da lugar a multitud de paradojas. Especialmente interesante es la frontera (difusa, paradójica) entre clásico y cuántico.

La óptica presenta características muy atractivas en la relación entre sus versiones clásica y cuántica: (i) En óptica la observación experimental de fenómenos cuánticos (estadística superPoissoniana o compresión de cuadraturas por ejemplo) es más sencilla que en otras áreas. (ii) En óptica clásica la descripción estadística forma parte de los contenidos estándar. Por ello resultan muy útiles las analogías entre luz clásica y sistemas cuánticos. (iii) Los fenómenos no lineales son parte del contenido estándar de óptica y se relacionan de forma natural y práctica con el resto de la fenomenología. (iv) La óptica presenta una compatibilidad natural entre fundamentos y aplicaciones prácticas. Es común que ya en un primer curso de óptica abunden las referencias a las aplicaciones prácticas.

Los puntos anteriores, de forma separada o combinada, describen nuestra investigación. En los apartados siguientes damos algunos detalles de nuestras líneas de investigación citando las

contribuciones más representativas en cada tema. Para más detalles puede visitar nuestra página en Internet [1] donde puede encontrar resúmenes más elaborados, y enlaces a las publicaciones [2-44] donde encontrará la bibliografía relevante, omitida aquí por razones de espacio.

2. Metrología cuántica

El principal objetivo de la metrología cuántica es detectar señales débiles de la forma más eficiente posible, con especial interés en determinar la influencia de la naturaleza cuántica de la radiación. La estructura típica de un proceso de detección es universal y se esquematiza en la Fig. 1.

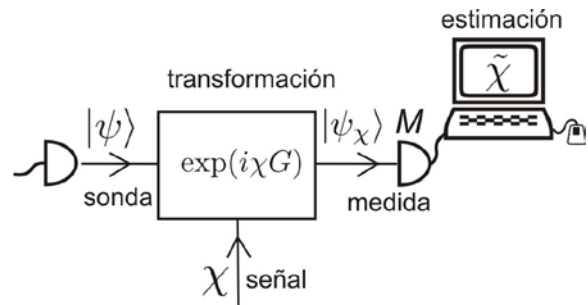


Fig. 1: Esquema general para la detección de una señal.

El valor de la señal a detectar χ (que típicamente puede representar un cambio de longitud, temperatura, etc.) se obtiene detectando el cambio experimentado por una sonda que sufre una transformación dependiente del valor de la señal. El objetivo es inferir el valor de la señal con la menor incertidumbre posible. La incertidumbre depende de una serie de elecciones: (i) El estado inicial de la sonda $|\psi\rangle$. (ii) La transformación dependiente de la señal que experimenta la sonda, representada por el generador G . (iii) El

valor de la señal χ . (iv) La medida M realizada para detectar el cambio de estado de la sonda. (v) El análisis de datos conducente al valor estimado $\tilde{\chi}$ y a su incertidumbre $\Delta\tilde{\chi}$. Este esquema abstracto incluye cualquier montaje espectroscópico o interferométrico, tanto clásico como cuántico.

El objetivo fundamental en metrología cuántica es determinar el estado sonda óptimo, el generador de transformaciones óptimo, la medida óptima, y el tratamiento de datos óptimo conducentes a una inferencia con la menor incertidumbre posible.

En este contexto estudiamos los límites cuánticos últimos a la resolución en detectores de ondas gravitacionales y los estados sonda óptimos para alcanzarlos [2,15].

En el apartado de transformaciones dependientes de la señal, proponemos utilizar la propagación en medios ópticamente no lineales para imprimir en la sonda la información relevante sobre la señal [28,41,42]. Esta opción presenta notables ventajas frente a los dispositivos lineales estándar al reducir en muchos órdenes de magnitud la incertidumbre sin comprometer la robustez frente a imperfecciones prácticas.

En el apartado de la inferencia estadística estudiamos medidas de incertidumbre de tipo entrópico que permiten superar las dificultades que encuentra la varianza [13,22,34-36].

3. Luz no clásica

Los estados de luz no clásicos son la prueba clara de la necesidad de la teoría cuántica. Por ello su estudio es siempre de importancia, no sólo académicamente, ya que los estados sonda óptimos son no clásicos, al menos para detección lineal [42].

Sorprendentemente, no es trivial definir qué se ha de entender por luz clásica, lo que acaba siendo una cuestión de convenio o relativa al contexto. La definición más usual es que los estados clásicos son los estados coherentes (auto-estados del operador amplitud compleja) o cualquier combinación incoherente de ellos. No obstante, en el fondo esta definición responde a una elección concreta de

correspondencia entre estados cuánticos y distribuciones estadísticas clásicas, por lo que son posibles otras formulaciones, todas ellas legítimas. Un área que se presta muy bien a formulaciones alternativas es la polarización ya que el espacio clásico no es plano (esfera de Poincaré). Un resultado relevante de esta libertad de elección es que los estados coherentes pueden presentar comportamientos no clásicos en diferentes contextos [16,23].

Estudiamos y aplicamos criterios muy generales y sencillos para revelar propiedades no clásicas [38]. Como los estados clásicos son un subconjunto del total de estados posibles sólo pueden explicar un subconjunto del total de resultados experimentales posibles. Cualquier resultado fuera de ese subconjunto de resultados clásicos se convierte en evidencia de la naturaleza cuántica del estado de luz observado. La ventaja de estos criterios es que no requieren tratamiento de datos ninguno (ni medias, ni varianzas siquiera) por lo que son muy robustos frente a errores e imperfecciones experimentales.

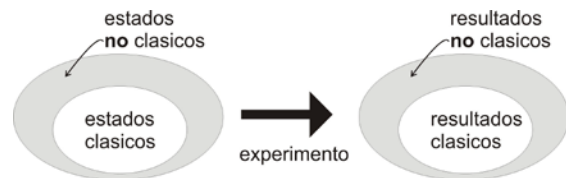


Fig. 2: Detección de luz no clásica.

Las propiedades no clásicas de luz se suelen presentar en forma de comportamientos paradójicos. Entre ellos la complementariedad [6,12,13] (la observación de una propiedad impide la observación de otras), el efecto Zenón [4] (la observación de un proceso impide que tenga lugar), el efecto anti-Zenón [7] (la observación de un proceso acelera su realización), las medidas sin interacción [8] (es posible detectar óptimamente un objeto sin iluminarlo). En este apartado nuestro esfuerzo se dirige a elaborar explicaciones dinámicas que resuelven lo paradójico y hacen estos fenómenos equiparables a otros más comunes. Casi todos admiten explicaciones muy sencillas en términos de incoherencia inducida por la observación que frustra la interferencia de amplitudes de

probabilidad inherente a toda evolución. En este sentido las analogías en óptica clásica de fenómenos cuánticos resultan particularmente útiles y poderosas para entender fenómenos cuánticos.

4. Polarización

Hay muchos factores que hacen de la polarización un fenómeno muy atractivo. Experimentalmente es un grado de libertad sencillo de manejar. Teóricamente es relativamente fácil de describir y tiene paralelos con muchos otros conceptos en ámbitos cuánticos, como el espín por ejemplo. En este contexto investigamos qué puede aportar la naturaleza cuántica de la radiación a la polarización de la luz y viceversa [23,24]. También estudiamos la forma más correcta de representar luz cuántica sobre la esfera de Poincaré [18,23]. La representación sobre una esfera es más compleja que sobre un espacio plano y como consecuencia aparecen comportamientos no clásicos incluso para estados coherentes [23].

También estamos interesados en la mejor forma de trasladar al dominio cuántico la idea de grado de polarización [10]. En particular son interesantes formulaciones que involucren promedios estadísticos a todo orden en los campos mas allá del segundo orden involucrado en los parámetros de Stokes. En el dominio clásico suelen ser suficientes caracterizaciones estadísticas de segundo orden en los campos, puesto que en la mayor parte de los casos la estadística es Gaussiana. No ocurre lo mismo en el caso cuántico donde momentos estadísticos de órdenes superiores son cruciales. Por ejemplo, las fluctuaciones de los parámetros de Stokes son de cuarto orden en los campos y son necesarios para caracterizar una propiedad básica como es la compresión [24].

5. Fase en óptica cuántica

Hay muchas razones que hacen de la fase una variable insustituible en óptica clásica. La fase de una onda contiene las claves de su propagación, gobierna la interferencia y es fundamental para

conceptos como el de coherencia. Uno pensaría que la fase debería tener una importancia semejante en óptica cuántica. Sin embargo esto no es así debido a razones históricas (el uso extensivo de la idea de fotón, cuya fase completamente aleatoria enmascara el papel de la fase en muchos fenómenos) y matemáticas (no hay operador de fase que tenga todas las propiedades deseables). En este contexto nuestro objetivo es trasladar a la óptica cuántica todo el poder explicativo y de análisis que tiene la fase en óptica clásica. Para ello hemos explicado la mayor cantidad posible de fenómenos en términos de la estadística de la fase, soslayando en todo lo posible las dificultades matemáticas y enfatizando los aspectos físicos [3,5,6,8,9]. Con este objetivo nos hemos centrado en la diferencia de fase, puesto que es una variable más significativa que la fase absoluta. La forma natural de manifestarse la fase es como diferencia de fase o fase relativa a una de referencia, como ocurre en interferencia por ejemplo. Sorprendentemente, resulta que la diferencia de fase en óptica cuántica se comporta matemáticamente mucho mejor que la fase absoluta.

Entre otros fenómenos, aplicamos la fase cuántica a la complementariedad cuántica mostrando que la observación del camino seguido por un fotón en un interferómetro destruye la interferencia como resultado de la aleatorización de la diferencia de fase causada por la interacción con el aparato de observación [6,8]. También estudiamos el papel que juega de la diferencia de fase en la coherencia y resolución de medidas interferométricas [26,36,39,43]. Resulta que la estadística de la diferencia de fase es una buena generalización a todo orden de la idea de coherencia, expresada de forma más común en términos de momentos de segundo orden en los campos, lo que muchas veces es insuficiente en óptica cuántica.

6. Propiedades ópticas formuladas como distancias y entropía Renyi

En óptica clásica y cuántica es muy común extraer de un sistema una serie de parámetros estadísticos que lo caractericen, por ejemplo el grado de polarización, el grado de coherencia, la

incertidumbre de un observable, o la extensión espacial de una onda que se difracta. La extracción rara vez es unívoca por lo que hasta cierto punto es materia de convenio. Una elección ubicua es la varianza. Otra que cada vez gana más implantación son diversos estimadores estadísticos basados en diferentes entropías. Aunque la varianza tiene ventajas innegables, sus desventajas tampoco son pequeñas. Por ejemplo confiere mucha importancia a los valores más altos de la variable, aunque por su pequeña probabilidad o poca intensidad no sean significativos, lo que conduce a divergencias desagradables e injustificadas. Por otro lado se centra en exclusiva en el primer y segundo momento de la variable, lo que sobre todo en óptica cuántica puede ser claramente insuficiente.

Por ello estudiamos caracterizaciones paramétricas alternativas a la varianza basadas en la entropía de Renyi por su facilidad de cálculo y significación física. Normalmente resulta ventajoso formular los parámetros que caracterizan un estado de luz como distancias, lo que los hace más intuitivos y significativos. Este es el caso del grado de polarización [10,17] (distancia a la luz despolarizada), correlaciones [14] (distancia a la luz descorrelacionada), visibilidad [11] (distancia al patrón uniforme), coherencia [27,34] (distancia a la luz incoherente), resolución interferométrica de señales [35] (distancia entre la señal y el fondo), etcétera.

También aplicamos la entropía de Renyi para la medida de fluctuaciones o la anchura de una onda difractada [22], obteniendo resultados intrigantes que todavía no han sido bien entendidos.

7. Coherencia entre ondas vectoriales

Siendo la idea de coherencia fundamental en el desarrollo de la óptica moderna, resulta casi paradójico que su estudio quedara relegado a ondas escalares. Podría pensarse que es debido a que su extensión a ondas vectoriales sea trivial. Pero resulta que no lo es, como muestran los esfuerzos realizados en los últimos años para suplir esta falta. La complejidad que aporta la polarización se traduce en la existencia de

propuestas incompatibles entre si, incluyendo nuestra propia propuesta [27]. En este apartado uno de nuestros objetivos es mostrar que se tratan de formulaciones complementarias en lugar de incompatibles [32]. Un único grado de coherencia no haría justicia a la riqueza que aporta la polarización. De este modo distintas formulaciones se centran en distintos aspectos de un mismo fenómeno. Una forma de englobar aproximaciones diferentes al problema es formular la interferencia de dos ondas vectoriales transversales como casos de interferencia entre cuatro campos eléctricos escalares.

Dicho de otra forma, interferencia y polarización son dos manifestaciones particulares de la misma idea, que pueden darse de forma conjunta o separada y que pueden convertirse una en otra [27,29,33,36,44]. Por ello no debe hacerse ninguna distinción entre ellas a la hora de estimar la coherencia. Esta unificación de polarización e interferencia permite también acomodar conceptos como el enredamiento (entanglement) de ondas vectoriales [40].

8. Espacio de fase. Formulación geométrica de la propagación de ondas clásicas

Una herramienta muy poderosa tanto en óptica clásica como en óptica cuántica es la representación de la luz como funciones sobre el espacio de fase del problema (conjunto de coordenadas necesarias para especificar completamente el estado del sistema clásico). El ejemplo más conocido es el de la función de Wigner. Las ventajas que ofrecen estas formulaciones son sobre todo facilidad de cálculo y de análisis. En el caso cuántico permite visualizar de forma casi clásica problemas más oscuros en la formulación cuántica usual en el espacio de Hilbert. En el caso clásico permite una descripción más intuitiva de ondas mediante rayos de luz.

En principio tales funciones deberían ser distribuciones de probabilidad en cuántica o irradiancia en óptica, pero realmente no lo son, en el caso cuántico debido precisamente a la

naturaleza cuántica de la radiación y en el caso clásico debido a la coherencia. Estas características no solo no paliar la utilidad de estas formulaciones de la óptica, sino que la incrementan, puesto que permiten utilizarlas para estudiar no clasicidad [23] y coherencia [25,26].

Uno de nuestros objetivos es desplegar todas las potencialidades de esta herramienta. En el caso clásico la función de Wigner permite formular la propagación de la luz en forma geométrica, como rayos que transportan función de Wigner en lugar de irradiancia [19–21,26,30,31,37]. También trasladamos a la polarización en óptica clásica la función de Wigner introducida en mecánica cuántica para describir el espín [19,20,31]. Esto conduce a unos parámetros de Stokes generalizados que contienen información completa de la polarización y de la propagación, lo que incluye en particular la coherencia [21,30,37].

9. Conclusiones

En los apartados anteriores hemos presentado un breve resumen de nuestra investigación. Un interés constante es transferir la mayor cantidad posible de resultados, métodos, etc. entre óptica cuántica y clásica. Por un lado podemos entender resultados cuánticos abstractos o paradójicos aprovechando los conceptos y herramientas más intuitivas de la óptica clásica. Por otro lado, intentamos trasladar al dominio clásico toda la potencia de cálculo y análisis que se ha desarrollado para la óptica cuántica. Esperamos hacerlo sin traicionar ni tergiversar ambas disciplinas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el proyecto FIS2008-01267 de la Dirección General de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación, y por el proyecto QUITEMAD S2009-ESP-1594 de la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid.