

Excmo. Sr. Presidente,
Excmos. e Ilmos. Sres. Académicos y Autoridades,
Señoras y Señores:

Ingresa hoy en nuestra Academia el Profesor D. Manuel Quintanilla Montón. Como es bien conocido, su ingreso tardío no es debido a falta de mérito por su parte, sino a que ha tardado veinticinco años en decidirse a presentar su discurso de ingreso, posiblemente para celebrar las bodas de plata de su nombramiento. Me ha correspondido la tarea de contestar al discurso de ingreso del que primero fue mi profesor, después un buen compañero y finalmente un magnífico amigo. Me siento por ello muy honrado, aunque un tanto abrumado por la responsabilidad que supone hablar sobre una persona con una calidad científica y humana como la que él ha demostrado.

Manuel Quintanilla Montón nació en Tarazona en 1937. Llevó a cabo los estudios de Licenciatura en Ciencias Físicas en la Universidad de Zaragoza, finalizando en 1959 con la calificación de Premio Extraordinario. Comenzó a trabajar bajo la dirección del Profesor D. Justiniano Casas Peláez en separación de isótopos por difusión térmica. Los contactos establecidos con el Instituto de Química Física de la Universidad de Zúrich le permitieron realizar una estancia de año y medio en dicho centro. Allí llevó a cabo la parte experimental de su trabajo doctoral (dirigido por el Profesor Casas de la Universidad de Zaragoza y por el Profesor Clusius de la Universidad de Zúrich) que versó sobre la medida de coeficientes de difusión térmica en moléculas isotópico-isobáricas del metano y que obtuvo, en 1963, la calificación de Sobresaliente cum Laude y Premio Extraordinario.

Los conocimientos adquiridos le permitieron participar, de forma muy activa, en la etapa final de la construcción y puesta a punto de un espectrómetro de masas en la Universidad de Zaragoza, que supuso un logro científico de gran importancia para la física experimental española del momento. Su participación directa en los trabajos de separación de isótopos por termodifusión se extendió hasta el año 1967 (un año antes de conseguir su plaza de Profesor Agregado Numerario en la Universidad de Zaragoza).

Llegó entonces para el Profesor Quintanilla lo que suele ser habitual en un científico: el cambio de tema de trabajo. Inició entonces sus trabajos de investigación sobre diseño y análisis de instrumentos ópticos, al que dedicó muchos años de su vida. Al poco tiempo, en 1971, le ocurrió lo que antes era habitual en un profesor: tuvo que trasladarse a otra Universidad (y comenzar de nuevo) al haber obtenido una Cátedra de Óptica y Estructura de la Materia.

Su nuevo comienzo tuvo lugar en la Universidad de Valladolid, con unos amplios espacios vacíos, ausencia de medios técnicos y la compañía de su doctorando (Santiago Mar Sardaña) que ahora es Catedrático en dicha Universidad. El Profesor Quintanilla siguió investigando en su último tema de trabajo (que estaba relacionado con la óptica) pero, en coherencia con la otra parte del título de su Cátedra (estructura de la materia), comenzó a trabajar en espectroscopía de plasmas. Posteriormente consiguió conectar ambos temas cuando inició su trabajo en holografía y la aplicó al diagnóstico de plasmas. Cuando, al cabo de diez años, el Profesor Quintanilla se trasladó a la Universidad de Zaragoza, en la Universidad de Valladolid se había transformado e incrementado la docencia de la óptica y se habían creado los laboratorios de docencia de óptica y de física nuclear; se habían creado los laboratorios de investigación de "producción y medida de plasmas y de holografía, alrededor de los cuales un grupo de diez personas llevaban a cabo investigación de calidad con unas bases tan sólidas que han permitido al grupo seguir trabajando con éxito durante los casi treinta años que han transcurrido desde el traslado del Profesor Quintanilla.

A su vuelta a la Universidad de Zaragoza continuó con sus trabajos de investigación en holografía. Por una parte, inició una colaboración en la investigación que llevaba a cabo el Profesor Savirón sobre dinámica de fluidos, aplicando técnicas de diagnóstico óptico, que derivó en el desarrollo de una línea de trabajo sobre técnicas holográficas de diagnóstico en fluidos. Por otra parte, inició sus trabajos sobre diseño y construcción de componentes y dispositivos holográficos para distintas aplicaciones. Estas han sido sus líneas trabajo hasta el presente.

El trabajo científico citado ha dado lugar a un nutrido número de publicaciones y a trece tesis doctorales dirigidas por él. Afortunadamente, su actividad no ha cesado con la jubilación (que tuvo lugar en el año 2007) y, como Profesor Emérito, ha seguido con empeño su actividad científica, que ha sido reconocida por la Real Sociedad Española de Física y por la Sociedad Española de Óptica mediante sus nombramientos como socio de honor.

Como docente ha desempeñado también una labor extraordinaria. Las circunstancias que lo han rodeado lo han sometido a encargos docentes muy nutridos, que él ha sabido compatibilizar siempre con una docencia de calidad. Puedo dar fe de ello como ex-alumno

suyo. Como compañero de trabajo siempre ha estado dispuesto a ayudar a las personas que lo han necesitado sin importarle el tiempo que tuviese que emplear para ello. Además siempre ha estado implicado en aquellas tareas que han contribuido a mejorar la infraestructura docente e investigadora de su Departamento y, cuando ha considerado que podría ser de utilidad, se ha implicado en tareas de gestión a distintos niveles. Su tesón ha sido tal que ha conseguido hasta resultados contrarios a cualquier pronóstico. Como ejemplo quiero decir que, en una larga labor en el tiempo, consiguió convencer a sus compañeros del interés de solicitar la impartición de la Diplomatura de Óptica y Optometría. Al final nuestra convicción fue tal que, cuando la Universidad de Zaragoza decidió implantar los estudios, fuimos capaces de desempeñar con entusiasmo las tareas que nos correspondieron a cada uno.

Toda esta admirable labor del Profesor Quintanilla ha sido posible gracias a su tesón y su intensa dedicación al trabajo (bien conocida por su paciente esposa María Teresa) que le hacen merecedor del ingreso en nuestra Academia. Pero si con una sola palabra pretendiésemos definir al Profesor Quintanilla esta sería "exhaustivo. Siendo fiel a ella ha redactado su discurso de ingreso en esta Academia de forma que me ha dejado muy pocas posibilidades de contestarle sin repetir algo de lo que ya haya hablado él. Afortunadamente, la holografía ha suscitado mucho interés en ámbitos externos al suyo propio (tanto científicos como filosóficos) y se ha convertido en plataforma de lanzamiento de nuevas ideas. En particular y dentro del ámbito de la holografía cuántica, la correlación de fotones (a la que dediqué quince años de mi vida investigadora) puede llevar a cabo aportaciones interesantes al mundo de la holografía.

Uno de los temas al que se ha dedicado un gran esfuerzo en holografía ha sido el de la mejora del registro holográfico. A lo largo de los años se ha trabajado en la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales para registro. Se han estudiado emulsiones fotográficas, medios fotorrefractivos, fotopolímeros y otros materiales, tratando de conseguir alta sensibilidad energética, alta resolución espacial, rapidez en el registro y otras propiedades que permitan optimizar el registro holográfico. Pero la optimización del material de registro no es la única posibilidad que existe para mejorar el registro holográfico. Otra posibilidad es encontrar técnicas de registro diferentes que aporten mejoras. Vamos analizar este nuevo camino.

Para ello recordemos que, en un holograma, el registro de la distribución de intensidad originada por la interferencia entre el haz de referencia y la onda que proviene del objeto contiene información suficiente para la reconstrucción de esta onda. Más concretamente, la información está contenida en la función de correlación de segundo orden de los campos eléctricos de las ondas que interfieren. Es bien conocido que la información completa que transporta un haz de luz cualquiera está contenida en las funciones de auto-correlación

de todos los órdenes de su campo eléctrico. Pero no menos cierto es que, en general, la información que contienen estas funciones de auto-correlación tiene cierto grado de redundancia. Esto significa, por una parte, que no suelen ser necesarias todas ellas para describir el haz y, por otra parte, que la misma información puede estar contenida en funciones de auto-correlación de distintos órdenes. Por ejemplo, en un haz de luz caótica gaussiana (que es la luz emitida por las fuentes habituales y que está generada por un número muy grande de partículas) toda la información está contenida en la función de auto-correlación de segundo orden (o lo que es lo mismo en su transformada de Fourier, que coincide con el espectro del haz de luz) y basta con esta función para describir el haz de forma completa. No obstante la información se distribuye también, de forma redundante, en funciones de auto-correlación de órdenes superiores y podría obtenerse a partir de su medida. Un caso particular fácilmente medible es el de la función de auto-correlación de segundo orden de la intensidad del haz de luz, que es una función de auto-correlación de cuarto orden de su campo eléctrico. Su medida se ha revelado como una técnica muy fructífera denominada espectroscopía de correlación de fotones.

Como hemos visto anteriormente al analizar el registro de un holograma, la información completa está contenida en la función de correlación de segundo orden de los campos eléctricos que interfieren. Pero, por analogía con lo dicho anteriormente, la información debe estar también distribuida en las funciones de correlación de órdenes superiores. Basándonos en el éxito obtenido por la espectroscopía de correlación de fotones, podríamos tratar de obtener la información holográfica a partir de la función de correlación de intensidades de los dos haces de luz. En este caso, en lugar de hacer interferir primero los dos haces de luz y registrar su interferencia para producir el holograma, habría que registrar primero cada haz de luz, medir su correlación a partir de estos registros utilizando técnicas de coincidencia de fotones y guardar esta información holográfica en un ordenador para llevar a cabo posteriormente el proceso de reconstrucción. Por lo tanto el registro no se haría mediante los soportes clásicos sino mediante detectores fotoeléctricos sensibles a la posición o mediante matrices de fotodiodos. Con estos receptores se consigue una resolución inferior, por el momento, pero sus prestaciones en cuanto a sensibilidad y rapidez son muy superiores.

Para comprender la posibilidad de la correlación de fotones como técnica de registro holográfico vamos a analizar un experimento análogo sencillo como el de las rendijas de Young. Como sabemos, en este experimento la luz de una lámpara se focaliza sobre una rendija que sirve como fuente de luz que ilumina dos rendijas paralelas. Al otro lado de las rendijas se produce un fenómeno de interferencia de dos haces, debido a que las ondas de luz se dividen en dos caminos que atraviesan las dos rendijas, y se observa la distribución de intensidades originada. Analicemos ahora este fenómeno desde el punto de vista de los

fotones que salen de la fuente. La interferencia no puede ser debida a la superposición de dos fotones diferentes porque la fuente emite fotones que son incoherentes unos con otros. Por lo tanto está claro que la interferencia se origina a partir de cada uno de los fotones individuales y que son los campos eléctricos del mismo fotón los que, al atravesar las rendijas, se superponen e interfieren. Como la probabilidad de presencia del fotón en un punto concreto es proporcional al módulo al cuadrado del campo eléctrico en ese punto, la distribución de impactos de los fotones en el plano de observación reproduce la distribución de intensidades originada por el fenómeno interferencial. Si en lugar de registrar las interferencias de forma clásica quisiéramos registrarlas mediante la medida de la función de correlación de intensidades, en lugar de medir la distribución de impactos de los fotones deberíamos medir la probabilidad de que se produjesen impactos simultáneos en dos puntos diferentes para todos los pares de puntos posibles del plano de observación. Por lo tanto, en este caso estaríamos registrando un fenómeno de interferencia a dos fotones. El estudio teórico detallado de este fenómeno revela que, para que exista esta interferencia, no basta con que los dos fotones sean coherentes entre sí sino que es preciso que estén entrelazados.

Dos fotones están entrelazados cuando el proceso de interacción luz-materia que los genera impone ligaduras a los valores que tienen algunas magnitudes cuando se miden en un fotón o en el otro. Estas ligaduras se mantienen a lo largo de la propagación de los fotones, aunque estos lleguen a estar muy alejados, de forma que si una de las magnitudes entrelazadas se mide en uno de los fotones se conoce el valor que presentaría si se midiese en el otro. Resulta evidente que el entrelazamiento introduce correlación entre ambos fotones. En nuestro caso necesitamos que aparezca correlación entre las intensidades de los dos haces de fotones entrelazados. De los varios mecanismos que producen pares de fotones entrelazados me limitaré al que de forma casi exclusiva se ha estado utilizando durante los últimos años para estudiar el tema que nos ocupa. Me refiero a la emisión espontánea paramétrica con reducción de frecuencia, que se obtiene excitando de forma no resonante un cristal no lineal sin centro de simetría mediante un láser de bombeo. En este proceso un fotón de bombeo se convierte en un par de fotones cuya suma de energías es igual a la energía del fotón de bombeo y cuya suma de momentos lineales es igual al momento lineal del fotón de bombeo. Al salir los fotones de cada par en direcciones bien determinadas y separadas se obtienen dos haces (haz de señal y haz complementario) de fotones entrelazados que pueden manejarse como convenga. El entrelazamiento de las energías de los fotones de un par y el entrelazamiento de sus momentos lineales (que equivale a un entrelazamiento de sus direcciones de propagación) hacen que los haces de señal y complementario presenten correlación de intensidad, como se ha demostrado mediante estudios teóricos y experimentales.

Disponemos por tanto de una fuente luminosa adecuada para observar las interferencias en un montaje de rendijas de Young mediante la medida de la función de correlación de intensidades, siempre que este montaje se lleve a cabo en unas condiciones adecuadas que permitan obtener las interferencias con un buen factor de visibilidad. Recordemos que en el caso del montaje clásico, en el que se mide la distribución de intensidad, hace falta que el tamaño de la fuente iluminadora sea suficientemente pequeño como para que las dos rendijas sean iluminadas coherentemente. En caso contrario, los máximos y mínimos de interferencia producidos por fotones emitidos en distintos puntos de la rendija se enmascaran unos con otros y la visibilidad se degrada. En el caso de interferencias con fotones entrelazados hay que tener en cuenta que solamente existe correlación entre los fotones de un par cuando existe entrelazamiento entre los momentos lineales además del entrelazamiento entre las energías. Pero debido al principio de incertidumbre posición-momento si el tamaño de la fuente es pequeño la incertidumbre en la posición de los fotones emitidos es pequeña, lo que hace que la incertidumbre en sus momentos lineales sea grande y desaparezca el entrelazamiento entre ellos. Esto implica que el tamaño de la fuente (que viene regulada por el diámetro transversal del haz de bombeo) debe ser suficientemente grande como para obtener un buen entrelazamiento. Un análisis teórico más profundo demuestra que es el tamaño angular de la fuente (vista desde el plano de las rendijas) el parámetro que regula el entrelazamiento. Como consecuencia de esto aparece una complementariedad entre la coherencia espacial (que es precisa para observar interferencias a un fotón) y el entrelazamiento (que es preciso para observar interferencias a dos fotones) de forma que cuando se adecúa la fuente para optimizar la observación de uno de los fenómenos el otro es inobservable. Todo esto se ha verificado experimentalmente dirigiendo los haces de señal y complementario de una fuente de pares de fotones emitidos por emisión espontánea paramétrica con reducción de frecuencia hacia dos rendijas paralelas, mediante el uso de una lente. Utilizando un detector bidimensional de luz al otro lado de las rendijas se ha medido la distribución de intensidades y la función de correlación de intensidades. Para tamaños angulares de la fuente suficientemente grandes se ha encontrado una buena visibilidad en las interferencias detectadas midiendo correlación de intensidades y mala visibilidad en las detectadas midiendo el perfil de intensidad. Sin embargo, para tamaños angulares suficientemente pequeños de la fuente se ha encontrado lo contrario.

Los resultados anteriores, en perfecta concordancia con las predicciones de los modelos teóricos, demuestran que la información contenida en la interferencia de dos haces puede registrarse mediante medidas de correlación de intensidades siempre que los dos haces estén formados por fotones entrelazados. Como cada par de fotones entrelazados debe ser descrito mediante un estado cuántico, lo que significa que la interferencia entre los

dos fotones es una interferencia del estado cuántico consigo mismo, el estudio teórico de las correlaciones de intensidad hay que hacerlo mediante una descripción cuántica de los campos y por tanto de las correlaciones. La obligatoriedad del uso de fotones entrelazados para poder conseguir estas correlaciones conduce a ciertas ventajas que creo interesante analizar.

Es bien conocido que cuando se lleva a cabo un experimento de interferencia de dos haces obtenidos a partir de una fuente común (como ocurre en un interferómetro de Michelson o de Mach-Zehnder) solamente se obtienen interferencias apreciables cuando la diferencia entre los caminos ópticos de los dos haces es inferior a la longitud de coherencia de la luz emitida por la fuente. La consecuencia de esta realidad cuando se aplica a la interferencia entre el haz de luz que proviene del objeto y el haz de referencia, que tiene lugar en el registro holográfico clásico, es la limitación del tamaño del objeto que puede ser holografiado. Al llevar a cabo interferencias con los haces de señal y complementario provenientes de una fuente de fotones entrelazados como la que hemos descrito anteriormente, se encuentra que sigue habiendo correlación cuántica apreciable aunque la diferencia de caminos ópticos sea superior a la longitud de coherencia. Esto implica que la técnica de correlaciones cuánticas permite el holografiado de objetos mayores que la técnica clásica.

El experimento de rendijas de Young vuelve a darnos nueva luz cuando se miden en él las correlaciones cuánticas de formas diferentes. Si, en lugar de dirigir los dos haces de fotones entrelazados a las rendijas, se dirige solamente uno de ellos (el haz de señal por ejemplo) y se mide la correlación cuántica entre la luz de este haz que hay al otro lado de las rendijas y la luz del haz complementario, se detectan perfectamente las interferencias a dos fotones. Sin embargo las interferencias a un fotón producidas por las rendijas en el haz de señal son indetectables porque cuando los pares de fotones emitidos están entrelazados la anchura excesiva de la fuente los enmascara. Pero en realidad cada fotón del haz de señal está produciendo interferencias al otro lado de las rendijas, como hemos visto anteriormente. Por lo tanto, al correlacionarlo con su fotón entrelazado esta interferencia se manifiesta. Tenemos aquí un ejemplo de cómo la correlación cuántica manifiesta información que queda enmascarada para la correlación clásica debido a la incoherencia espacial.

Para entender otras ventajas adicionales es preciso recurrir a la técnica de tomografía óptica coherente, que es de gran utilidad en el análisis de muestras biológicas (fundamentalmente en oftalmología, cardiología y dermatología) y en el análisis de pinturas. La luz de una fuente de espectro muy ancho se divide en dos haces: haz de prueba y haz de referencia. La superposición de la luz del haz de prueba que se refleja en la muestra a observar y la luz del haz de referencia produce una estructura interferencial cuya inten-

sidad de pende de la cantidad de luz reflejada. La gran anchura espectral de la luz hace que las interferencias solamente aparezcan cuando la diferencia de los caminos ópticos de los dos haces es muy pequeña, lo que permite determinar con buena precisión la posición axial del punto del que proviene la luz reflejada que se está analizando. El control del camino óptico recorrido por el haz de referencia mediante el movimiento de un espejo hace que cambie la posición axial del punto de la muestra observado en cada momento. Esto, combinado con un barrido horizontal de la muestra, permite obtener una imagen tridimensional de la misma. En lugar de detectar la correlación clásica contenida en las interferencias se puede detectar la correlación cuántica. Tanto los modelos teóricos como los resultados experimentales conducen a dos ventajas de la correlación cuántica, debidas al uso de fotones entrelazados. En primer lugar, el uso de pares de fotones entrelazados origina una mejora en un factor dos de la resolución espacial en la imagen. En segundo lugar, el entrelazamiento hace que se cancelen los efectos de dispersión de la velocidad de grupo que ocurren cuando el haz de prueba atraviesa la muestra y que limitan la precisión en la medida de la posición en profundidad.

De todo lo expuesto anteriormente se desprende que el registro holográfico mediante correlaciones cuánticas debe permitir el holografado de objetos mayores, con una mejora de un factor dos en su resolución espacial y eliminando los defectos cromáticos que la dispersión del objeto podría originar, así como problemas originados por incoherencia espacial. Una vez analizadas estas ventajas, que podemos unir a las del método de registro expuesto anteriormente, solamente queda describir con algo más de detalle este método, que requiere la producción de dos haces de fotones entrelazados y el uso de uno de ellos como haz de referencia y del otro como iluminador del objeto a holografar. Aunque la obtención de la estadística de coincidencias entre los impactos de los fotones del haz de luz que proviene del objeto y los del haz de referencia sobre sendos detectores bidimensionales permite obtener la interferencia cuántica entre ambos, los modelos teóricos indican que este no es el método de registro idóneo si se quiere simplificar al máximo el proceso de reconstrucción. El método idóneo consiste en sustituir el detector bidimensional del haz que viene del objeto por un detector que registre los impactos de los fotones con independencia de su posición y medir la probabilidad marginal de registrar un impacto en este detector y un impacto en una posición determinada del detector bidimensional colocado en el haz de referencia. El funcionamiento óptimo de este método se obtiene si el detector del haz objeto rodea a dicho objeto, dejando un hueco para la entrada de la luz iluminadora. Este método ha sido utilizado con éxito en el registro y reconstrucción de imágenes bidimensionales (llamadas imágenes cuánticas) y en el registro y reconstrucción holográfica tanto de objetos de variación de amplitud como de variación de fase.

Lo expuesto hasta aquí es un ejemplo del interés que ha suscitado la holografía en

temas candentes de la física actual. A pesar de ello yo no creo que la holografía sea importante por esto. Creo que es importante porque personas como el Profesor Quintanilla han dedicado un gran esfuerzo para que la holografía exista y sea útil y ese esfuerzo los hace merecedores de nuestro reconocimiento. Por ello y cumpliendo la misión que me ha sido encomendada, tengo el placer de concluir mi discurso diciendo: Profesor Quintanilla, querido amigo, bienvenido a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza como Académico Numerario. He dicho.